低天端有脚式離岸堤の消波性能と波力特性について

CHARACTERISTICS OF WAVE ABSORPTION AND WAVE FORCE ON THE PILE-SUPPORTED WAVE ABSORBING BREAKWATER WITH LOW CROWN HEIGHT

山野貴司[1]・藤原隆一[2]・野村浩二[3]
Takashi YAMANO, Ryuichi FUJIWARA, Kouji NOMURA

[1]正会員　修(工)　東洋建設株式会社 総合技術研究所 鳴尾研究所
(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)
[2]正会員　博(工)　東洋建設株式会社 総合技術研究所 鳴尾研究所（同上）
[3]東洋建設株式会社 名古屋支店（〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-17-13)

Recently, a variety of pile-supported wave absorbing breakwaters have been adopted to keep calmness in the back of breakwater. In addition, low-crested breakwaters are needed from the viewpoint of the landscape. Then, the authors designed the structure of the pile-supported wave absorbing breakwater with a low crown height. This structure has prescribed characteristics of wave absorption and decreasing wave pressure. In addition, the decrease of uplift pressure was attempted by removing the ceiling slab. As a result of examination by hydraulic model tests, it was confirmed that both horizontal wave forces and vertical wave forces decreased. Reflection coefficients and transmission coefficients of the proposed breakwater are equal to usual offshore structures for control of wave and current. Moreover, an effect of a crown height that exerts on characteristics of wave absorption was clarified by using the CADMAS-SURF/2D (SUper Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure /2D).

Key Words : *pile-supported wave absorbing breakwater, low-crested breakwater, slit-type breakwater, reflection coefficient, transmission coefficient, wave force*

1．はじめに

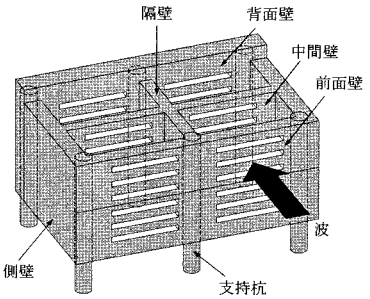
MMZ 計画（建設省総合技術開発プロジェクト「海洋利用空間の創成・利用技術の開発」，昭和 61 年～平成 2 年）において堤体背後の静穏域を形成する様々な海域制御構造物として新型離岸堤が開発された．しかしながら，海底勾配が急勾配でかつ地盤条件が良好でない箇所では，一般的な重力式の離岸堤では設置水深が大きくなり，断面も大きくなるため，杭によって構造物を支持する有脚式離岸堤 [1]が採用されてきた．最近ではさらに景観の観点から，従来の構造に比べてより低天端の構造が求められている．そこで筆者らは，低天端有脚式離岸堤について複数断面の比較から従来の海域制御構造物と同等の性能を有する断面について検討してきた [2]．天端高の設定については，従来の有脚式離岸堤の天端高が H.W.L.から 1～2m 程度であるのに対し，天端高を消波対象水深上 0.5m とした．その結果，所定の消波性能を有し，堤体に作用する波力の低減効果も得られたが，さらに鉛直波力（揚圧力）を低減できる余地があると考えられた．そこで，上床版を取り除くことで揚圧力の低減を図り，より経済的な断面を追求することとした．本研究では，考案断面の海域制御構造物としての妥当性を水理模型実験によって検討した結果を示し，消波性能に及ぼす低天端構造の影響を考察した．さらに，数値波動水路（CADMAS-SURF/2D，以後 CS2D と略記）[3]を用いた透過率，反射率の計算結果の妥当性を水理模型実験結果によって検証し，これを用いた消波特性についても考察した．

2．実験概要

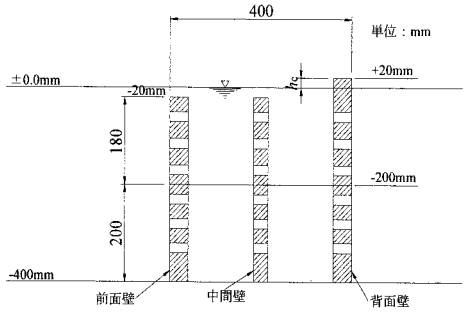
(1) 対象構造物

本研究で対象とする低天端有脚式離岸堤のイメージおよび消波性能実験での模型断面を**図-1** に示す．本構造物は床版および上床版をもたない前面壁・中間壁・背面壁の 3 枚の水平スリット鉛直壁と隔壁および側壁で構成される箱型躯体の消波構造物であり，

これらを杭で支持する．消波対象水深に対して，前面壁および中間壁の天端部は没水し，背面壁は水面上となる形状を基本構造とした．スリットの開口率は背面壁の総面積に対してε=0.16 とした．なお，支持杭は実験結果に影響がないため，実験模型では省くこととした．



(a) イメージ



(b) 実験断面図（消波性能実験）

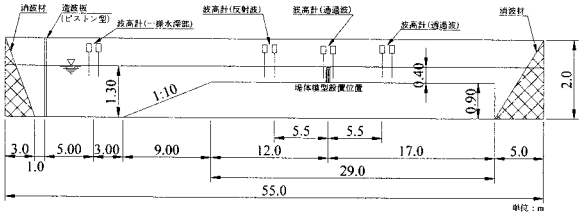
図-1 対象構造物

(2) 実験方法

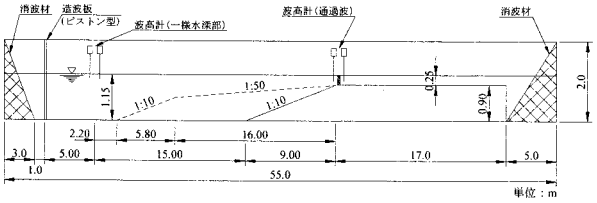
実験は東洋建設(株)鳴尾研究所の長さ 55m，幅 1m，深さ 2m の二次元造波水路を用いた．**図-2** に，水路内の仮設床，波高計および実験模型の配置を示す．消波性能実験では水平床とし，波力実験では模型前端に 1:10 または 1:50 の海底勾配を設置した．消波性能実験の実験条件一覧を**表-1** に示す．消波性能実験は周期 T=1.6～2.8s，波高 H=4.0～16.0cm とし，基本条件では短周期（T=1.2s）および長周期（T=3.2s）の波についても検討を行った．また，天端高の影響を検討するために現地で L.W.L.～H.H.W.L.に相当するように水深を変化させた場合についても検討した．不規則波は，修正 Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを目標とした．反射率は入・反射波分離推定法（合田ら，1976）[4] を用い算出した．

次に波力実験の一覧を**表-2** に示す．波力実験については T=1.90～2.53s，波高は海底勾配 1:10 で H=10.0～36.0cm 程度，1:50 で H=10.0～26.0cm 程度の間で 3 種類変化させ，模型位置で砕波を含む条件で検討を行った．また，波力は 2 台の二分力計を用いて測定を行い，それぞれの測定値の合力を全波力として算出した．さらに全 19 台の波圧計による測定も同時に行った．

なお，縮尺は消波性能実験においては 1/25，波力実験では 1/40 を想定した．



(a) 消波性能実験



(b) 波力実験

図-2 造波水路断面図

表-1 実験条件一覧（消波性能実験）

(a) 規則波

T(s)	H(cm)	h(cm)	h_c(cm)	備考
1.2-3.2	4.0-16.0	40.0	2.0	基本条件
1.6-2.8	4.0-16.0	37.0	5.0	L.W.L.相当
1.6-2.8	4.0-16.0	44.0	-2.0	H.W.L.相当
1.6-2.8	4.0-16.0	48.0	-6.0	H.H.W.L.相当

(b) 不規則波

$T_{1/3}$(s)	$H_{1/3}$(cm)	h(cm)	h_c(cm)	備考
1.6	8.0	40.0	2.0	基本条件
2.0	8.0			
2.4	8.0			

表-2 実験条件一覧（波力実験）

(a) 海底勾配 1:10

T(s)	H(cm)	h(cm)	h_c(cm)	備考
1.90-2.53	10.5-33.8	25.0	1.3	基本条件
1.90-2.53	10.5-33.3	23.1	3.1	L.W.L.相当
1.90-2.53	10.3-35.0	27.5	-1.3	H.W.L.相当
1.90-2.53	10.3-35.8	30.0	-3.8	H.H.W.L.相当

(b) 海底勾配 1:50

T(s)	H(cm)	h(cm)	h_c(cm)	備考
1.90-2.53	9.8-22.8	25.0	1.3	基本条件
1.90-2.53	9.8-23.3	23.1	3.1	L.W.L.相当
1.90-2.53	9.8-26.3	30.0	-3.8	H.H.W.L.相当

3．実験結果および考察

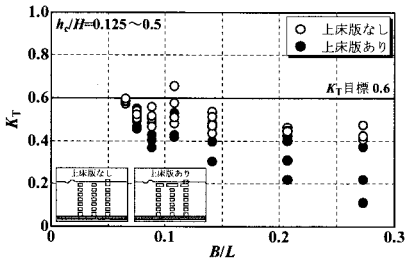
(1) 上床版の有無による比較

筆者らは，前面壁の天端と同じ高さに上床版（開口率ε=0.10）を有する断面の検討を行ってきたが，その断面を比較対象とし，本研究で用いた上床版のない断面の消波性能および波力低減効果を確認した．

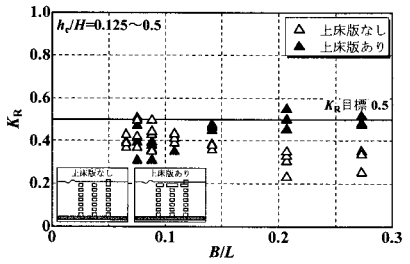
a) 消波性能の比較

図-3 に，基本条件に対する上床版の有無による透過率 K_T および反射率 K_R を比較した結果を相対堤体幅 B/L との関係で示す．K_T，K_R ともに，B/L<0.15 では上床版の有無による差違は小さいが，B/L>0.15 では上床版のあるときの K_T は上床版がないときに比べて小さく，逆に K_R は大きくなってい

る．B/L が大きくなると上床版の設置高が水面に近いこともあって，入射波が反射される効果が顕著となり，そのために透過率が小さくなっていると考えられる．また，上床版がないときの K_T，K_R は海域制御構造物の目標値（透過率 0.6 以下，反射率 0.5 以下）を一例を除き満足しており，消波性能の目標はクリアしていることが確認できた．目標値を満足できなかったケースの波浪条件は H=16.0cm，T=2.0s であり，高波浪に相当する．この様な波浪条件で上述の目標値を満足するには，天端高 h_c を高くすれば，堤体幅を大きくすることなく対応が可能である．例えば模型縮尺を 1/25 とした場合，上述の条件は H=4m，T=10s，h_c=0.5m となるが，後述する天端高の検討結果を用いると h_c=0.75m とすればよい．不規則波に対する結果は図示することができないが，有義波周期 $T_{1/3}$ を規則波の周期 T と対応させると規則波の結果とよく一致した．



(a) 透過率 K_T



(b) 反射率 K_R

図-3 透過率 K_T，反射率 K_R と B/L との関係

b) 波力低減効果の比較

図-4 に，海底勾配 1:10 の条件での水平波力最大時の単位面積当たりの鉛直波力 f_V を無次元化した結果を示す．図中にはスリット型海域制御構造物の鉛直波力の結果（萩原ら，1989）[5]を併せて示した．各比較対象断面の鉛直波力に対する受圧面積の割合は，堤体全面積に対して上床版がある場合は 95%，上床版がない場合は 41%，萩原らの断面では 28%である．無次元鉛直波力は受圧面積の割合に応じて大きくなるようであり，上床版がない場合の無次元鉛直波力は上床版がある場合に比べて約 70%低減し平均値で 0.12，また最大で 0.2 程度となった．また，海底勾配 1:50 の場合についてもほぼ同様の結果であり，平均的に 0.11，最大で 0.2 程度であった．これらのことから上床版をなくすことで期待した鉛直波力の低減を得られることが確認できた．

水平波力については，波圧分布が合田式の分布形状に相似していたことから，最大水平波力と合田式との比で表される波力低減率 λ_K を用いて評価した（**図-5** 参照）．図中には，低天端ケーソン堤の海底勾配 1:100 の場合の結果（藤原ら，1996）[6]を併せて示した．海底勾配が異なるため直接的な比較は難しいが，低天端ケーソン堤に比べて λ_K はかなり小さくなっており，低天端による波力低減に加えスリット構造による波力低減が得られている．上床版がある場合の λ_K は上床版がない場合に比べて平均的に約 60%低減し 0.47（最大 0.76）であったことから，水平波力に対しても上床版をなくしたことで波力低減効果を得られたことが分かる．これにより，岸側の支持杭の根入れ長を上床版があるときに比べて短くできることを確認している．なお，図示はできないが海底勾配 1:50 においても，上床版がない場合の λ_K は平均で 0.50 となった．

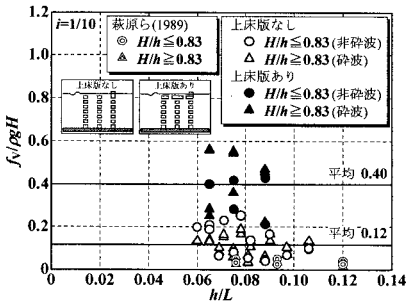


図-4 鉛直波力と波高，周期の関係

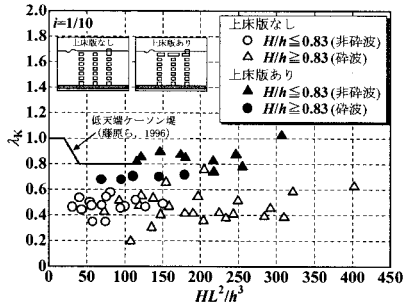
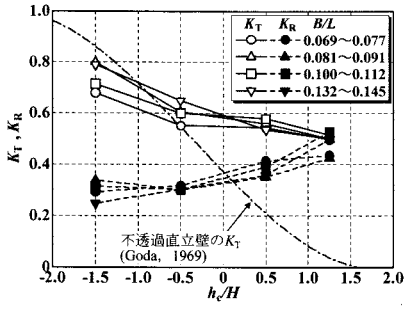


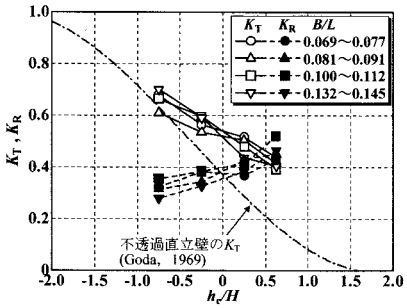
図-5 波力低減係数 λ_K とアーセル数(HL^2/h^3)の関係

(2) 相対天端高 h_c/H に対する K_T，K_R

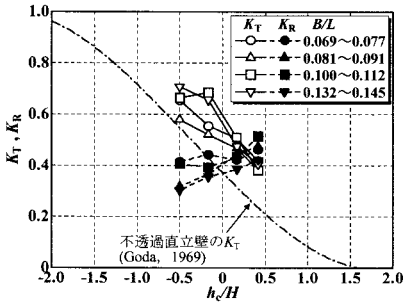
透過率 K_T，反射率 K_R は相対堤体幅 B/L だけでなく，相対天端高 h_c/H，波形勾配 H/L によっても変化する．ここでは h_c/H に対する K_T，K_R に着目し，**図-6** に入射波高別に整理した結果を示す．図中には，相対堤体幅 B/L の範囲およびマウンドがない場合の不透過直立壁の K_T の結果 [7]を併せて示した．全般的な傾向として h_c/H が小さくなると堤体上を通過するエネルギーが増加するために K_T が大きくなり，逆に K_R は小さくなる．h_c/H>-0.5 における K_T は，スリット部を透過する波エネルギーのため不透過直立壁の場合より大きいが，h_c/H<-0.5 になると堤体が水没するために堤体上を通過する波エネルギーに比べてスリット部の影響が相対的に小さくなっていると考えられる．



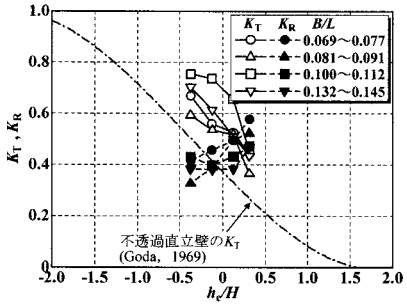
(a) H=4.0cm (H/L=0.007～0.015)



(b) H=8.0cm (H/L=0.014～0.029)



(c) H=12.0cm (H/L=0.021～0.044)



(d) H=16.0cm (H/L=0.027～0.058)

図-6 K_T, K_R と h_c/H との関係（水深変化）

(3) 砕波状況を考慮した波力低減率の評価

波力低減率λ_Kは堤体作用時の波の砕波状況によって変化する．砕波形式はサーフ・シミラリティ・パラメタIr ($=i/(H_0'/L_0)^{1/2}$) の大きさと関連づけられており，Irを用いた波力低減率の設定が可能と考えられる（国栖ら，1989）[8]．まず，砕波時と非砕波時におけるλ_Kと波高水深比H/hの関係について**図-7**に示す．図中には非砕波の平均値を併せて示した．H/h>0.8では砕波となるがばらつきが大きくなるとともにH/hの増加に応じてλ_Kが大きくなる傾向が表れている．これらは砕波形式に起因すると考えられるため，Irとの関連を整理した．

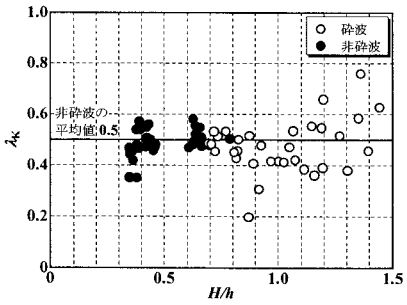


図-7 波力低減率λ_Kと波高水深比 H/h の関係

図-8はλ_KとIrの関係を示したものであるが，図中には服部・川又（1976）が示すIrによる砕波形式の区分[9]および後述する推定式を併せて示した．概ねλ_Kが大きくなるのはIr=0.4付近となっており，spilling型からplunging型へとなる所に相当している．Ir<0.4のspilling型の領域ではIrに応じてλ_Kが大きくなる傾向が見られる．一方，Ir>0.4の領域では，Irに応じてλ_Kが小さくなるが，Ir>0.7になると一定値に近づくようである．0.4<Ir<0.7ではデータのばらつきが大きいが，これはplunging型の場合，波形が著しく非対称となり，空気を巻き込んで堤体に作用することが影響するためと考えられる．また，Irが同じ場合はH/hが大きいほどλ_Kは大きくなっている．

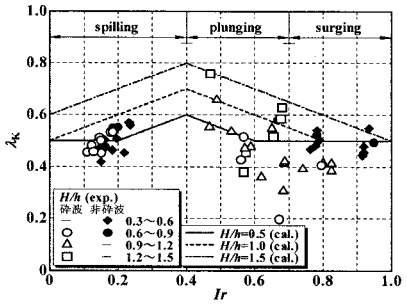


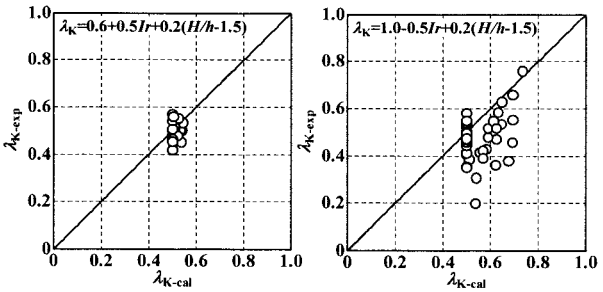
図-8 波力低減率λ_Kとサーフ・シミラリティ・パラメタ Ir の関係

推定式はIr=0.4でピークとなる分布を持つように式(1a)，(1b)のように設定した．

$$\lambda_K = 0.6 + 0.5Ir + 0.2(H/h - 1.5) : (0 < Ir < 0.4) \quad (1a)$$

$$\lambda_K = 1.0 - 0.5Ir + 0.2(H/h - 1.5) : (Ir \geq 0.4) \quad (1b)$$

ただし，非砕波時のλ_Kの平均値が0.50であったことから，0.5を最小値として与えるようにした．また，設計における利便性も考慮し，非砕波の条件に対してもIrを便宜的に算出し，λ_Kを推定した．λ_Kの推定式と実験結果の適合性を比較したのが**図-9**である．λ_Kはばらつきが見られるものの，ほぼ安全側の評価をしており，設計に用いることの妥当性が確認できた．



(a) 海底勾配 1:50　　(b) 海底勾配 1:10

図-9 推定式の適合性

4. 数値波動水路による堤体形状の妥当性の検討

(1) CS2D による計算結果の検証

次に，CS2D を用いて，本研究の対象構造物の消波特性を数値計算により考察した．

a) 計算条件

図-10 に計算領域を示し，**表-3** に代表的なパラメタの設定値を示す．計算領域については，計算時間短縮のため水路全長に設定せず 25m とした．また，海底床は一定水深とした．水平スリット鉛直壁については，スリット部の縮流現象を便宜的に与える縮流係数 C_C=0.6（小竹ら，2007）[10]を用い，実質開口率$\varepsilon'=C_C\varepsilon$=0.10 とした．

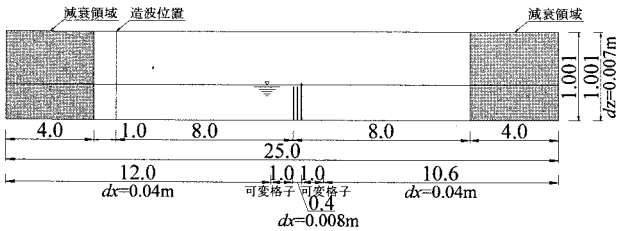


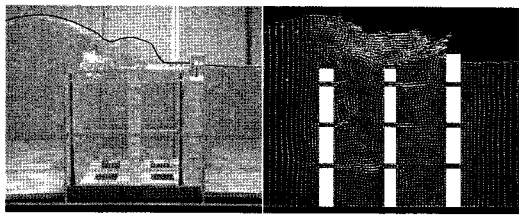
図-10 計算領域

表-3 代表的なパラメタの設定値

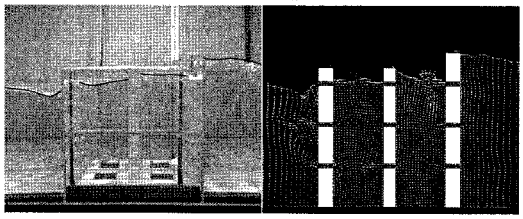
バージョン	V5.1	時間間隔	AUTO
x方向領域長(m)	25.0	計算時間(s)	40.01
z方向領域長(m)	1.001	減衰帯幅(m)	4.0
格子間隔dx(m)	0.04～0.008	差分スキーム	DONOR 0.2
格子間隔dz(m)	0.007	ポーラス下限値	0.1
x方向格子数	693	境界条件(流速･圧力)	VP SLIP
z方向格子数	143	境界条件(VOF関数F)	F FREE

b) 空間波形

図-11 に，基本水深（h=40.0cm）における押し波および引き波時の構造物周辺の空間波形を，実験写真と計算結果を比較して示す．実験写真には水面形状に実線を付加し，計算結果の空間波形には流速ベクトルを併せて示した．計算結果の水面形状は実験時のそれとよく一致している．押し波時には堤体上で波が砕ける様子が伺え，引き波時にはスリット間で渦が発生している様子が分かる．



(a) 押し波時

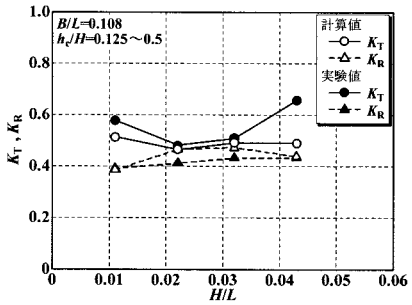


(b) 引き波時

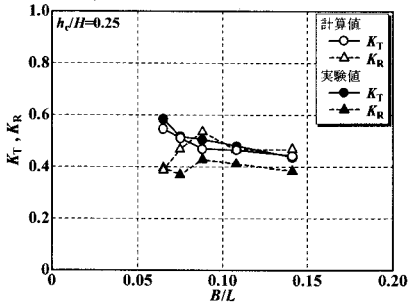
図-11 空間波形（基本水深，左：実験写真，右：計算結果）

c) 透過率・反射率の比較

次に，CS2D による K_T，K_R の計算値と実験値を比較した結果を**図-12** に示す．図は周期を T=2.0s に一定とした場合および波高を H=8.0cm に一定とした場合に分けて示した．全般的に K_R の計算値は周期，波高に関わらず若干過大評価される傾向にある．また，K_T の計算値は H/L>0.04 となるような場合には過小評価となる．これらを除けば実験値とよく一致している．H/L=0.043 の条件について，計算値および実験値の押し波時の堤体周辺の空間波形を**図-13** に示す．背面壁天端付近で越波により砕波している様子が分かる．CS2D では砕波に伴うエネルギーの減衰が過大に評価されることが知られており[11]，K_T の過小評価はこれによるものと考えられる．これらの結果より，H/L<0.04 では精度の高い計算を行うことが可能であることが分かった．



(a) K_T，K_R と H/L との関係（T=2.0s）



(b) K_T，K_R と B/L との関係（H=8.0cm）

図-12 計算値と実験値の比較

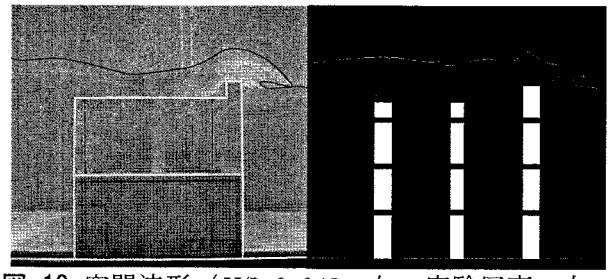
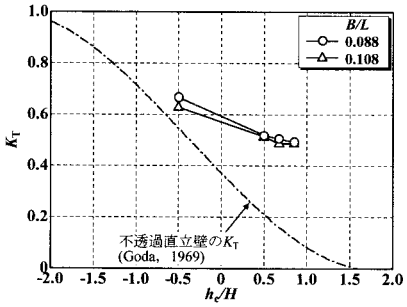


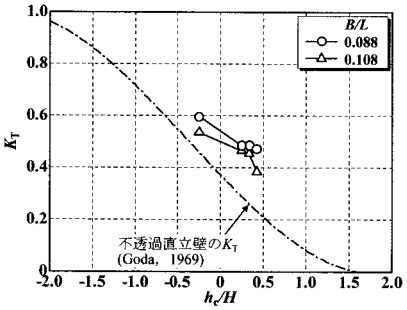
図-13 空間波形（H/L=0.043，左：実験写真，右：計算結果）

(2) 背面壁天端高の効果による妥当性の検討

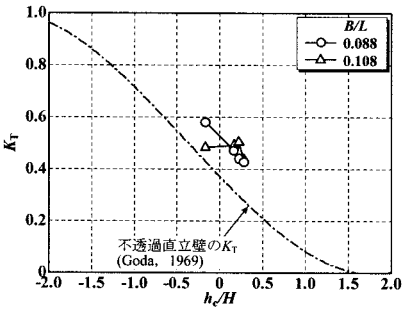
H/L<0.04 における CS2D の妥当性は確認されたので，この条件において背面壁天端高を変えて計算を行い，その効果について K_T に着目して検討した．背面壁の天端高を前面壁と同じ高さ（h_c/H =-0.5）から順次高くしたときの K_T の変化を h_c/H で評価したものを**図-14** に示す．図中には，マウンドのない不透過直立壁の K_T の結果 [7]を併せて示した．h_c/H が大きくなるにしたがい K_T は小さくなっている．このことから，堤体全体を嵩上げすることなく背面壁天端高のみを高くすることで K_T を低下させる本構造物の特徴が改めて確認できる．



(a) H=4.0cm（H/L=0.009～0.011）



(b) H=8.0cm（H/L=0.018～0.022）



(c) H=12.0cm（H/L=0.026～0.032）

図-14 K_T と h_c/H との関係（天端高変化）

5．まとめ

本研究のまとめを以下に示す．

○新たに考案した上床版を持たない低天端有脚式離岸堤の消波性能については K_T，K_R 共に目標値（透過率 0.6 以下，反射率 0.5 以下）を満足し，従来の海域制御構造物と同等の消波性能を有していることを確認した．

○上床版をなくすと鉛直波力を平均的に約 70%，水平波力を平均的に約 60%低減することを確認した．

○設計に用いる波力低減係数 λ_K について，砕波状況を考慮することができる推定式を提案し，その妥当性を検証して安全側の評価ができることを確認した．

○数値波動水路を用いた K_T，K_R の計算結果の妥当性を実験結果との比較により確認し，背面壁天端高の消波特性に及ぼす影響を明らかにした．

今後の課題としては，本研究では計算上は縮流係数の影響を考慮したが，実際の壁面は 3 次元性を持っているため，3 次元数値波動水槽（CADMAS-SURF/3D）を用いたより詳細な計算を行う必要があると考えられる．

参考文献

1) 建設省土木研究所：MMZ 計画策定の手引き（案），土木研究所彙報，第 57 号，1992.

2) 藤原隆一，山野貴司，野村浩二，長山英樹：低天端有脚式離岸堤に関する実験的研究，海洋開発論文集，第 25 巻，pp. 611-616，2009.

3) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会：数値波動水路（CADMAS-SURF）の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー，No. 12，2001.

4) 合田良実，鈴木康正，岸良安治，菊地治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，1976.

5) 萩原運弘，藤原隆男，宇多高明，村井禎美：スリット型海域制御構造物の砕波力特性と設計波力，海岸工学論文集，第 36 巻，pp. 514-518，1989.

6) 藤原隆一，貝沼憲男，興野俊也，石崎崇志，小竹康夫，津田宗男：低天端ケーソン堤に作用する波力特性について，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 761-765，1996.

7) Goda, Y. : Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwater, Rept. On the Port and Harbor Res. Inst, 1969.

8) 国栖広志，近藤浩右，清水正巳，宇多高明，村井禎美：透過式消波構造物の波力特性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 36 巻，pp. 569-573，1989.

9) 服部昌太郎，川又良一：海岸堤防による二次元海浜の地形変化，海岸工学論文集，第 23 巻，pp. 234-239，1976.

10) 小竹康夫，小淵康義，高橋重雄：直立消波堤に作用する波圧算定への数値波動水路の適用性検討，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 816-820，2007.

11) 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会：CADMAS-SURF 実務計算事例集，沿岸開発技術ライブラリー，No. 30，2008.