

超急傾斜海岸上の防波堤に作用する波圧 に関する実験的研究とその対策工の検討

EXPERIMENTAL STUDY OF WAVE PRESSURE ACTING ON BREAKWATER ON ULTRA-STEEP SEABED AND ITS COUNTERMEASURES

林浩志¹・中泉昌光¹・中山哲巖²・玉城達也³・小林学⁴・滑川順⁴
Hiroshi HAYASHI, Masamitsu NAKAIZUMI, Akiyoshi NAKAYAMA,
Tatsuya TAMAKI, Manabu KOBAYASHI and Jun NAMEKAWA

¹正会員 財団法人漁港漁場漁村技術研究所 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-14-10)

²正会員 工修 独立行政法人水産総合研究センター 水産工学研究所水産土木工学部
(〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

³沖縄県農林水産部南部農林土木事務所 (〒900-0029 沖縄県那覇市旭町1番地)

⁴財団法人漁港漁場漁村技術研究所 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-14-10)

Through hydraulic model experiments, we clarified the characteristics of wave transformation and wave pressure acting on an upright wall of the breakwater on the ultra-steep seabed and come up with the countermeasures in order to avoid an impulsive pressure or alleviate such an exceptional wave pressure.

The results of the study are as follows: As for wave transformation, wave height does not increase on the ultra-steep seabed. Wave pressure as well as the generation ratio of an impulsive breaking wave pressure decreases as the breakwater moves forward to the offshore. There hydraulic phenomena are related to the ratio of wave height to water depth and mean bottom slope. In the case of a sloping breakwater, the generation ratio of an impulsive breaking wave pressure diminishes and its size reduces to a half that of an upright wall. The transmitted wave height of a sloping wall is almost equivalent to that of an upright wall.

Key Words : *ultra-steep seabed, impulsive breaking wave pressure, sloping breakwater, hydraulic model experiments*

1. はじめに

沖縄本島の東方360kmの太平洋上に位置する南大東漁港においては、地元漁船や周辺漁場で操業する外来漁船の前進拠点あるいは避難港として掘り込み式漁港の整備が進められている。

島の周辺は気象・海象条件が厳しく、漁船の安全な出入港を図るため防波堤の建設が進められている。

しかし、南大東島は環状の珊瑚礁が隆起を繰り返し形成された隆起環礁の島で、水深2,000mの海に囲まれた独立峰のような孤島であり、その海底勾配は平均的に1/5、急勾配域では1/1に達する超急傾斜海岸となっている。

一般の海岸における波高変化の算定図は、1/100～1/10で、このような急勾配は適用範囲外にあり、

また、急傾斜海岸における波の変形や波圧・波力の研究事例としては、リーフ上のもので海底勾配を1/10とした仲座ほか¹⁾、小林ほか²⁾の研究がある程度である。

このため本研究では、水理模型実験により急傾斜海岸に位置する構造物に作用する波圧(波力)についての特性を明らかにするとともに、想定される強大な波力の発生を回避、もしくは低減する対策について検討を行ったものである。

2. 実験装置および実験の方法

実験は、幅1.0m×深さ1.5m(水深1.0m)×長さ100mの2次元造波水路で、ピストン型規則波・不規則波造波機(反射波吸収制御)を用いて行い、

模型縮尺は1/50とした．実験波浪はブレットシュナイダー・光易型のスペクトル形状を有する不規則波とし、波高8～11mと周期12～16secを組み合わせた5種類とした．実験水位は、現地での潮位より2.90m (H.H.W.L.)と0.10m (L.W.L.)の2水位とした．計測項目は、水面変動と波圧とし、水面変動については、容量式波高計を用い入射波と急斜面から岸側の計測を行った．また、波圧については、半導体型波圧計を用い計測し、計測位置は6～7点で作用波圧の分布形状が把握できるよう適宜変更した．サンプリング間隔は、水面変動を50Hz、波圧を5,000Hzとし、計測時間は、長周期波の周期を考慮し5分程度とした．

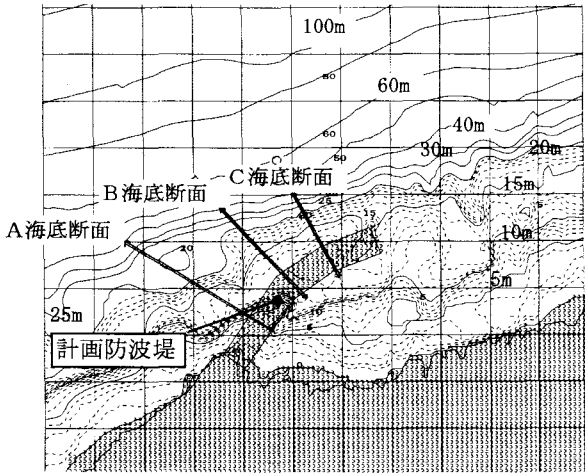


図-1 計画位置と等深線図

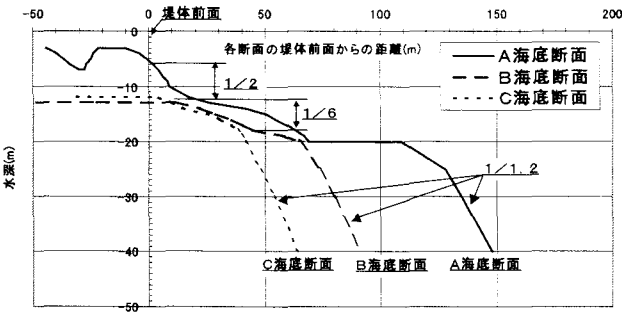


図-2 海底断面図

防波堤の計画位置と等深線を図-1に、防波堤の計画法線と等深線の形状から代表する3海底断面を図-2に示す．実験に用いた海底形状は図-3、4に示すとおり、B断面とC断面の斜面形状がほぼ同じであり、斜面岸側端から防波堤前面までの距離のみが違うことから、同じ海底形状とし、防波堤の設置位置を変化させることとした．

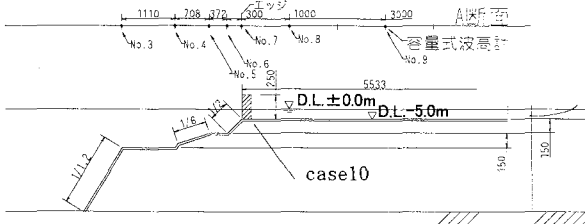


図-3 模型形状図 (A海底断面)

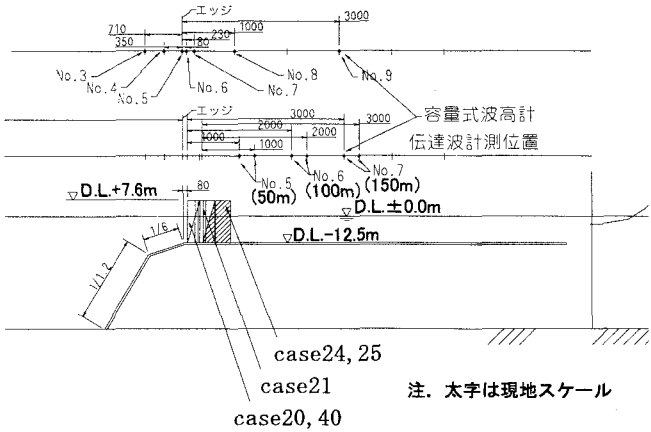


図-4 模型形状図 (B・C海底断面)

実験は、計画位置におけるA海底断面での直立堤 (case10)とB・C海底断面での直立堤 (case21, 20),そして、強大な衝撃砕波圧が予想されることから、B・C海底断面において、設置水深を深くした直立堤 (case40：沖だし、設置水深-17.0m)と斜面堤 (case25)について行った．なお、case24は、斜面堤の波圧低減効果を比較するために、斜面堤の法肩と同位置に設置した直立堤である．

表-1に実験ケースの一覧を示し、図-5は斜面堤の形状図である．ただし、1：急傾斜斜面の上端から堤体までの距離．

表-1 実験ケース一覧表

case	海底断面	堤体形状	設置水深	堤体設置位置 l (m)
10	A	直立堤	D. L. -5m	0m
20	B・C	直立堤	D. L. -12.5m	4m
21	B・C	直立堤	D. L. -12.5m	11.5m
40	B・C	直立堤	D. L. -17m	5m
24	B・C	直立堤	D. L. -12.5m	30m
25	B・C	斜面堤	D. L. -12.5m	30m

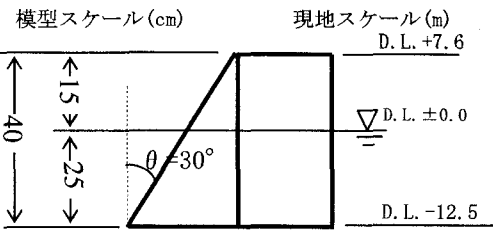


図-5 斜面堤模型形状図

3. 実験結果および考察

リーフ海岸特有の長周期波が波圧に与える影響について検討するため、計測データをWavelet Filterを用い短周期成分・長周期成分に分離した。その境界の周期は、入射波の有義周期の3倍を基準に、3倍以下の周期成分を短周期波、それ以上の周期成分を長周期成分とした。

(1) 超急傾斜海岸での波高変化

図-6(1)にA海底断面、図-6(2)に、B・C海底断面での進行波の計測結果を示す。ここで、 H_0' ：換算沖波波高、 T ：周期、 $H_{1/3}$ ：短長周期成分分離前の有義波高、 H_s ：短周期波有義波高（設計等で用いる通常の波） H_1 ：長周期波最大波高（現設計法で長周期波を考慮する場合の長周期波高）、 x ：急峻斜面上端（斜面肩）からの距離である。

短周期波高は、各断面とも堤体設置位置で入射波高に対し、H.H.W.L.で3～4%、L.W.L.で10～17%の減衰と顕著な変化は見られないが、H.H.W.L.に比べL.W.L.の方が減衰は大きくなっている。

この結果、超急勾配斜面の場合、斜面上では波高は増大せず、ほとんどが減衰の傾向にある。このことは、海底勾配が急になると浅水による波高増大は小さくなり、海底勾配1/3になると波高の顕著な増大が見られないとする河合³⁾の実験結果と同様な結果である。

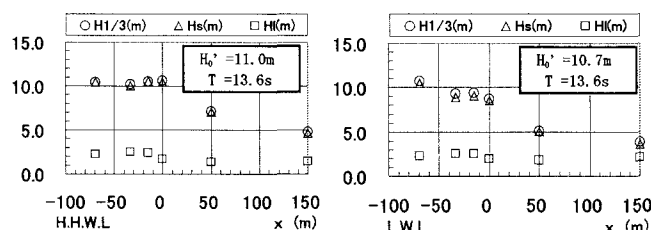


図-6(1) 波高変化図 (A海底断面)

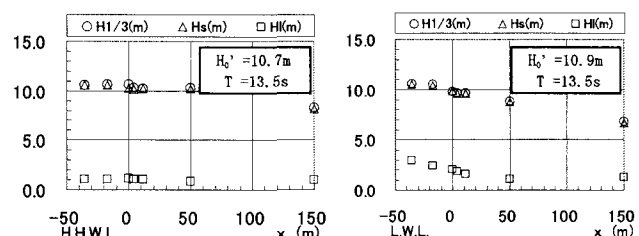


図-6(2) 波高変化図 (B・C海底断面)

(2) 波圧合力と波圧波形

図-7に波圧合力の時経列変化の一例を示す。図中の数値は、模型スケールで、平均波圧として、 $2w_0H_{1/3}$ および $4w_0H_{1/3}$ に相当する波力 P_{2H} 、 P_{4H} を実線で示している。（ただし、 $H_{1/3}$ ：進行波で計測された堤体位置通過波高で短長周期成分に分離前の有義波高、 w_0 ：水の単位体積当たり重量 (gf/cm^3 : mN/cm^3)）

また、図-8(1)、(2)には衝撃砕波力発生時の波圧

合力とそのときの各計測位置での波圧の時経列の一例を示す。波圧は、水面変動(η)の変化に比べると非常に短い時間で変化しており、ピーク波圧の発生に各波圧計で時間差がある場合(図-8(1))と、ほぼ同時に作用している場合(図-8(2))があり、その作用の形態も異なっている。

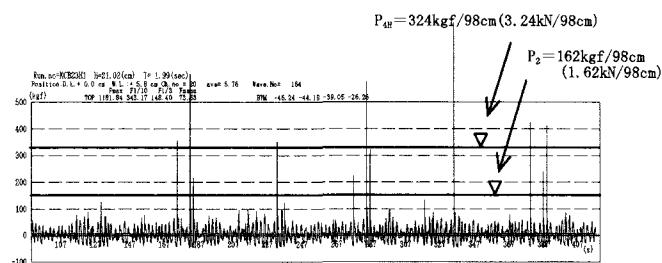


図-7 波圧合力の時経列図 (case20, H.H.W.L.)

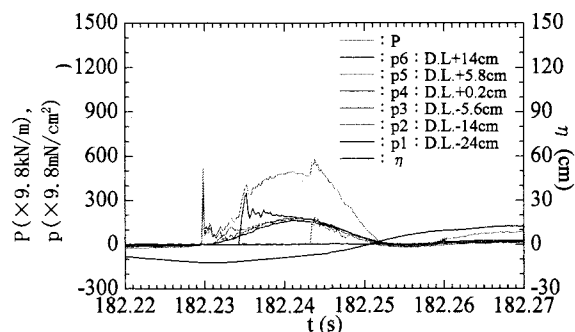


図-8(1) 衝撃砕波力発生時の波圧合力と各波圧の時経列図 (case20, H.H.W.L.)

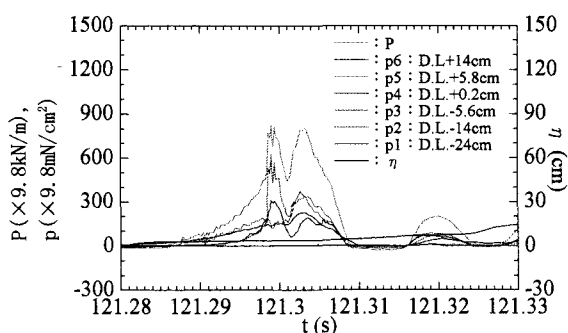


図-8(2) 衝撃砕波力発生時の波圧合力と各波圧の時経列図 (case20, H.H.W.L.)

(3) 波圧合力の時間変化

波圧合力の時間的な変化を、波圧合力がゼロを越えピークに達するまでの時間として、この立ち上がりの時間 τ' と無次元平均波圧強度 ($p/w_0H_{1/3}$) との関係を図-9に示す。

無次元平均波圧強度と立ち上がり時間は反比例し、砕波の平均波圧強度を $1.5w_0H_{1/3}$ とすると、その立ち上がり時間 τ' は、0.2s程度以上であるのに対し、

無次元平均波圧強度が5以上のような強い衝撃碎波圧が発生する場合の立ち上がり時間 τ' は、0.05s程度と非常に短い時間で起っている。

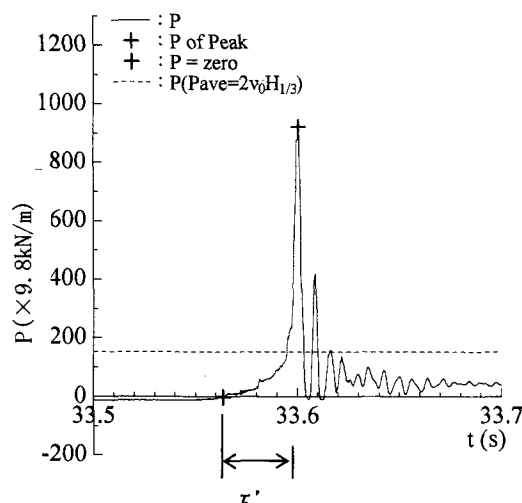
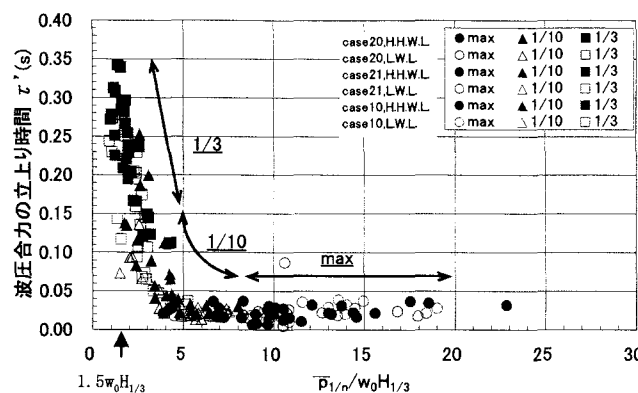


図-9 波圧合力の立ち上がり時間 τ' と無次元波圧強度との関係 (模型スケール)

(4) 無次元波圧強度分布

図-10(1)～(3)に、case10, 20, 21での1/10最大波力出現時の無次元波圧強度の分布図を示す。波圧強度が最も大きくなる位置は概ね静水面 (潮位面) 以下である。また、各海底断面ともその最大波圧強度は、H.H.W.L. に比べL.W.L.の方が大きくなっている。case20とcase21は、同一海底断面で斜面上端から、それぞれ4mと11.5mに防波堤が位置する場合で、わずかにcase21の方が大きい。これは、碎波位置により碎波した波の水面形が異なることから、そこからの距離によるものと考えられる。

case10は、case20・21に比べ設置水深が-5mとかなり浅くなっている。このとき特にH.H.W.L.では、case10よりcase20・21の方が波圧強度は小さい値と

なっている。このことは、急斜面上では、沖に向け水深が深くなるほど、波圧強度が低減することを示唆していると考えられる。

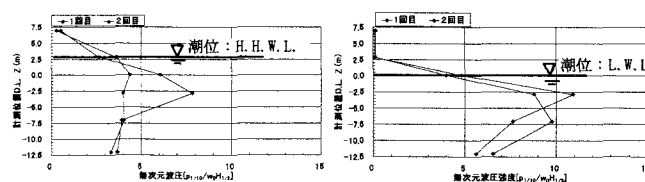


図-10(1) 無次元波圧強度の分布図 (case20)

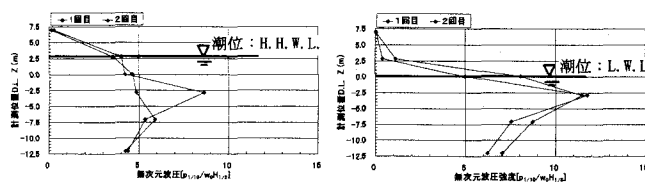


図-10(2) 無次元波圧強度の分布図 (case21)

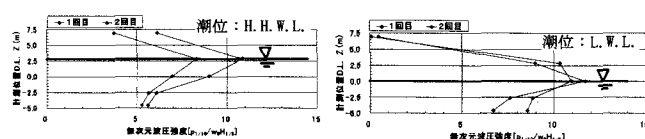


図-10(3) 無次元波圧強度の分布図 (case10)

(5) 波圧算定式との比較

実験での1/10最大波力での波圧 $F_{ex1/10}$ と、従来の波圧算定式 (合田の波圧算定式と広井式) による波圧の算定値 F_{cal} を図-11に示す。

実験から得られた波圧は、従来の波圧算定式で求めた値と比較すると、合田式の3倍、広井式の5倍 ($1.5w_0 H_{1/3}$ の2.5～5倍) にも達している。

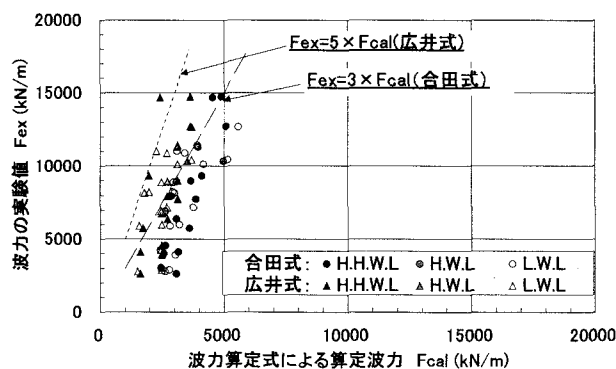


図-11 波圧算定式と実験値の比較

(6) 衝撃碎波圧の発生率

平均波圧強度を $2w_0 H_{1/3}$ 以上を衝撃碎波圧と定義し、その発生回数を衝撃碎波圧発生回数 (nb), それを全波数 (N_0) で割ったものを衝撃碎波圧発生率 (nb/ N_0) と

して、衝撃碎波圧発生率と波高水深比×平均海底勾配の関係を図-12に示す。

波高水深比×平均的な海底勾配が大きいと衝撃碎波圧発生回数が増える傾向にあり、衝撃碎波圧の発生に波高水深比×平均的な海底勾配が起因していると考えられる。

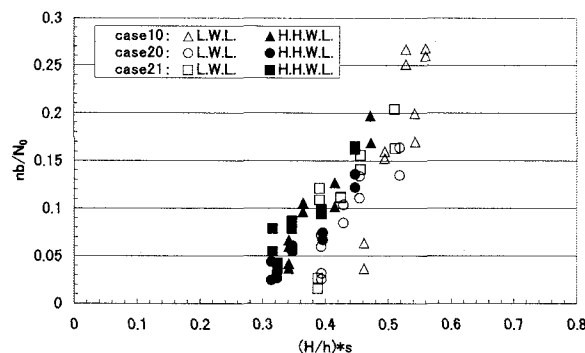


図-12(1) 衝撃碎波の発生率

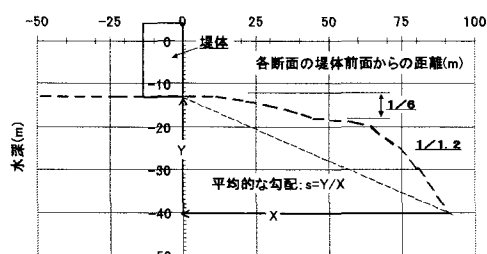


図-12(2) 平均海底勾配 s

4. 対策工の検討

沖に向け設置水深を深くすることで、重複波領域にすることで、無次元波圧強度の低減が期待できること、波高水深比×平均的な海底勾配が小さいと衝撃碎波圧発生回数が少なくなる傾向にあることなどから、対策工は、①設置水深を深くする沖だし工法と、衝撃碎波は水塊が堤体壁面に衝突し発生することから、②堤体壁面を斜面としてその発生を低減させる工法を検討することとした。

(1) 設置水深を深くした場合（沖だし案）

施工性を考え、水深-17.0mに防波堤を設置した場合について検討を行った。

a) 無次元波圧強度

図-13にH.H.W.L.での沖だしの場合の無次元波圧強度の分布を示す。図中には、各ケースとの対比のため、同条件での水深-12.5mと斜面堤の結果についても記入している。また、直立堤についても斜面堤との比較を明瞭にするために、斜面堤の法肩と同じ位置に設置したcase24の値としている。

沖だしの場合、無次元波圧強度は大幅に低減し、

鉛直方向の各層とも概ね2以下となり、水深-12.5mに設置したcase20, 21の無次元平均波圧強度と比較すると50%程度の減衰となった。

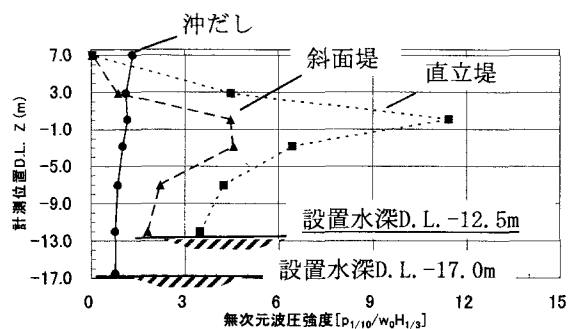


図-13 無次元波圧強度分布

b) 波圧合力

図-14に波圧合力と換算沖波波高の関係を示す。鉛直方向の波圧強度の減少とともに、波圧合力も水深-12.5mと比べ大幅に低下していることがわかる。

c) 衝撃碎波圧の発生率

衝撃碎波圧の発生はなく、平均波圧強度は $2w_0H_{1/3}$ 以下であった。このことは、沖だしで設置水深が深くなることにより、波圧作用面が増したにもかかわらず、図-14に示されるように、波圧合力が設置水深-12.5mでの波圧合力の1/6程度になっており、衝撃碎波圧発生を抑えることが波圧合力の低減に大きく影響しているといえる。

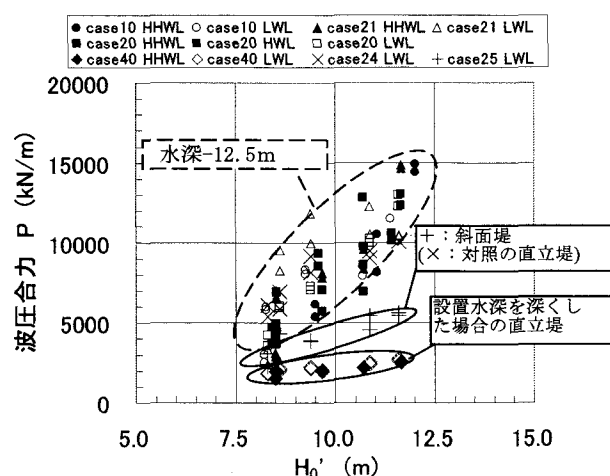


図-14 無次元波圧強度分布

(2) 斜面堤とした場合

図-5に示したように、斜面堤の断面は、設置水深-12.5mの実験結果から、最大波圧強度が静水面（潮位面）以下で発生していることから、堤体設置底面から60°の斜面を有する構造とした。

a) 無次元波圧強度

図-13に示されるように、斜面堤の場合の無次元波圧強度の分布は、沖だしの場合を除く直立堤と同じ形状を示すが、その最大無次元波圧強度は1/2程度、また、無次元平均波圧強度も1/2以下となる。

b) 波圧合力

斜面堤においても図-14に示されるように、水深-12.5mと比べ低下しているが、沖だしの場合よりも波圧合力が大きくなっている。

c) 衝撃砕波圧の発生率

衝撃砕波圧の発生はL.W.L.で3%あり、同じ条件でのcase22の19%に比べれば少ないが、衝撃砕波圧を受けることになり、この結果、沖だしの場合よりも波圧合力が大きくなっている。

d) 伝達波高

斜面堤における波高伝達率は、漁港の機能から、冬季風浪($H_0=5.5\text{m}$, $T=11.0\text{s}$)相当波を用い、堤体背後の3地点について伝達波高 H_t を計測した。

図-15に計測地点での波高伝達率(伝達波高 H_t /堤体位置通過波 H_i)を示す。

堤体設置前の堤体位置通過波高は $H_i=4.89\text{m}$ で、伝達波高 H_t は、直立堤、斜面堤とも0.6~0.8m程度、波高伝達率では0.1~0.15程度で、斜面堤と直立堤の違いは見られなかった

谷本・木村⁴⁾は、台形ケーソンの水理特性について、伝達波高は傾斜が大きいほど大きくなるとしている。こうした差異は、谷本・木村⁴⁾の実験では、海底勾配が1/100の一樣勾配であり、本研究における海底勾配1/6~1/1と大きく異なっているためと考えられる。

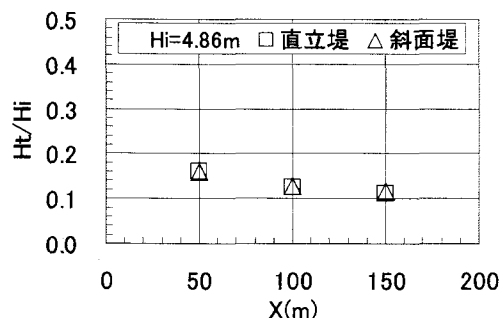


図-15 波高伝達率

5. まとめ

(1) 波高変化について

水深50m以浅での波高変化は、超急勾配斜面の場合、斜面上ではほとんど波高が増大せず、減衰することがわかった。このことは、河合³⁾の実験結果と

同様の傾向であるといえる。

(2) 波圧及び波力について

平均波圧強度で通常の砕波圧(広井式で $1.5w_0H$)の2.5~5倍にもなる場合があることがわかった。衝撃砕波圧の大きさの程度とその発生に波高水深比と平均的な海底勾配が起因していることがわかった。

(3) 衝撃砕波に対する対策工法の効果について

a) 沖だしの場合

沖だしたした場合の衝撃砕波の発生率の低減と全波力(波圧合力)の低減を確認できた。

b) 斜面堤の場合

堤体前面壁を斜面とした場合、衝撃砕波圧の発生が少なくなり、その作用波力は直立堤の50%程度に低減することがわかった。伝達波高については、直立堤と斜面堤で顕著な違いがなかった。

一方、直立面を傾斜面とした場合の研究例として谷本・木村⁴⁾が台形ケーソンの水理特性についての検討があり、斜面に作用する波圧(波力)には斜面の効果はほとんどないと報告している。また、伝達波高は、傾斜が大きいほど大きくなるとしている。こうした差異は、谷本・木村⁴⁾の実験では、海底勾配が1/100の一樣勾配であり、本研究における海底勾配1/6~1/1と大きく異なっているためと考えられる。海底勾配の違いは、砕波形態の変化に現れ波圧強度に影響を与えるものと考えられる。また、斜面の効果は、水粒子の運動がほとんど水平成分のみとなる衝撃砕波圧の発生する場合に顕著であると考えられる。

以上、海底勾配が超急勾配になることにより波浪および波圧特性(衝撃砕波圧)が劇的に変化することが明らかとなり、超急傾斜海岸における防波堤に作用する波圧特性から、その対策として、沖だしおよび斜面堤による波圧の低減効果が明らかになった。

参考文献

- 1) 仲座栄三, 日野幹雄, 津嘉山正光, 大城 勉: リーフ海岸における防波堤に作用する波力に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 589-593, 1989.
- 2) 小林 学, 中山哲蔵, 宮地健司, 楨本一徳, 金城哲男, 篠田邦裕, 佐藤勝弘: リーフ上の防波堤に作用する波圧に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 826-830, 2001.
- 3) 河合弘泰: 急傾斜海岸における波浪変形に関する水理模型実験報告書, 港湾技研研究所水工部波浪研究室資料, No. 85, 1995.
- 4) 谷本勝利, 木村克俊: 台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技研資料, No. 528, 1985.