

消波工の波浪制御特性に関する研究

越波現象における規則波模型実験と現地観測の相違点について

Research on characteristic of wave control by the wave energy dissipating structure.

The difference between the wave overtopping phenomenon
of the hydraulic model test and the field observation.

杉浦 国男

Kunio. Sugiura.

Abstract

A gentle slope wave energy dissipating structure with water cushion was constructed at Mitoyo, Kagawa, Prefecture, in 1984, on land reclaimed along the shore in order to prevent sea wind damage to farm products. This structure is based on the hydraulic model test. To new smaller structure types with water cushion have been constructed as a result of this observation and the the hydraulic model test twice. This thesis discusses the difference between the wave overtopping phenomenon of the hydraulic model tests and the field observation. The thesis concludes that it is difficult to represent the actual wave overtopping phenomenon from the hydraulic model test based on Froude Similitude.

1. はじめに

従来、海岸構造物の築造に当たってはフルード相似則に基づいた模型実験が行われ、その結果を基に構造物が築造されてきた。これは自然現象を対象とする構造物の築造に当たって、実現象を対象とする試験施工はその現象が生じる確率と期間・費用を考えた場合、非常に困難であることから改善の方法として妥当であると考えられる。しかし一方、構造物の築造後、模型実験が自然現象を適確に表現しているか、また構造物が実験予想の効果を発揮しているか否かの追跡が十分なされてきたとは言えない。波浪制御の代表的な構造物である消波工もその例外ではない。

現在、一般的な海岸で消波工を設置する場合は昭和62年3月に改訂された海岸保全施設築造基準解説のp176の3・2・6・7の消波工に示す表-3・2・7の消波工の諸元の標準を基に設計・施工される場合が多い。ところが、この標準はフルード相似則に基づいた模型実験の研究成果として作成されているものである。このため、現在の堤防に接続して捨て石マウンドの上に異形ブロックを台形状に積み上げる形式の消波工は十分な消波効果を有していない。この原因は実験と現地ではその消波機構が異なり、実験で有効とされた静水面上の異形ブロックが現地では波のエネルギー減殺にほとんど効果がないことによる。この欠点を克服した消波工としては香川県の三豊干拓地で施工されている遊水部付緩傾斜消波工がある。

今回、この消波工の築造に当たって行なった模型実験・現場施工・現地観測、消波工断面再検討のための予備実験・試験施工・本実験・縮小断面の現場施工・現地観測の過程で明らかになった模型実験と現地観測の相違点を述べてみる。

2. 模型実験による当初断面の決定と現地観測結果について

香川県の三豊干拓地は国営代行事業として昭和41年度に完成した農地面積98haの干拓地である。完成以来、種々の営農努力がなされ現在、水稻・レタス・バレイショ・タマネギ等が栽培されており年間数億円の粗収入があるこの地方の代表的な優良農地となっている。ところが干拓堤防が西方に面していて、季節風や台風時の風波による海水飛沫が干拓農地内に飛散して農作物に毎年のように大小の潮風害を発生させていた。

このため消波工設置を検討したが、従来の堤防に接続した台形断面消波工では海水飛沫の発生・飛散が顕著となり潮風害が広域化することが懸念された。図-1と写真-1はその状況を示したものである。

正会員 香川県仲多度土地改良事務所(765 善通寺市生野本町一丁目1番12号)

写真-1 隣接海岸消波工（台形断面）の越波状況

(1) 模型実験による消波工断面の決定

Figure 1 is a scatter plot showing the ratio of the diffusion coefficient to the hydrodynamic radius, D_s/H_0 , versus the concentration of the polymer solution, $Hg/10$. The y-axis ranges from 0 to 30, and the x-axis ranges from 0 to 0.08. Two data series are plotted: open circles for $V_m = 0$ and open triangles for $V_m = 4.9 \eta_s$. A horizontal line is drawn at $D_s/H_0 = 20$, labeled $(\frac{1}{25} \times 24.5 \eta_s)$. The data points for $V_m = 0$ are generally lower than those for $V_m = 4.9 \eta_s$.

-

Figure 1 is a scatter plot showing the ratio of the length of the magnetic field line to the radius of curvature, l_s/H_0 , versus the ratio of the magnetic field line length to the radius of curvature, H_0/L_0 . The y-axis ranges from 0 to 20, and the x-axis ranges from 0 to 0.08. The plot shows two data series: open circles for $V=0$ and open triangles for $V=4.9 \text{ m/s}$. The data points for $V=0$ are clustered near the origin, while the data points for $V=4.9 \text{ m/s}$ are scattered at higher values of l_s/H_0 .

H_0/L_0	l_s/H_0 ($V=0$)	l_s/H_0 ($V=4.9$ m/s)
0.028	4.0	17.0
0.030	1.0	18.0
0.040	4.0	18.0
0.042	5.0	20.0
0.045	4.0	12.0
0.055	5.0	17.0
0.060	7.0	16.0
0.065	6.0	19.0

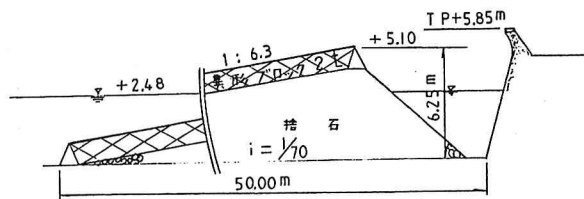


図-4 三角形断面消波工 (8タイプ)

— 254 —

この結果からわかるように図-3～4の消波工では従来形台形断面消波工の2タイプに比較して飛沫飛散距離 $\ell s/H_0$ が波形勾配 $H_0/L_0=0.04\sim0.05$ で有風の場合、約1/2程度に減少する。図-6に決定した遊水部付緩傾斜消波工の断面を示す。

この断面は先端部、緩傾斜部、水平部、遊水部に分け飛沫の発生をできるだけ減少すると共に工事費を節減する工夫をした。

(2) 現地観測結果

昭和59年3月に堤防の一部区間において図-6の消波工が完成して以来、消波工の潮風害防止効果が予測した水準に達しているかを観察した。この代表的な事例の現地消波状況を写真-2に示す。またその観測結果は表-1の通りである。

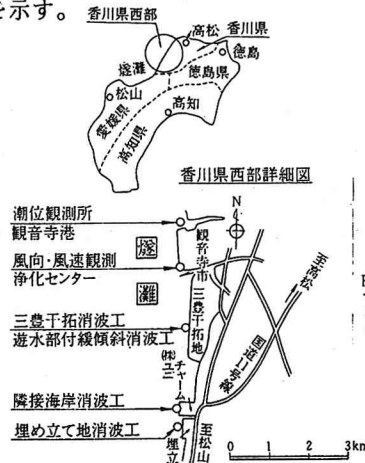


図-5 海岸消波工位置図

*工事費は1.0m当たり120万円と非常に高価である。

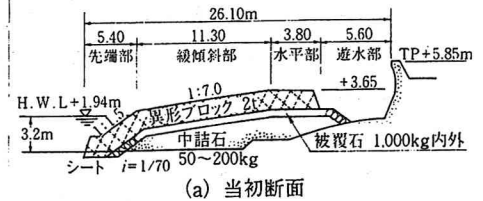


図-6 遊水部付緩傾斜消波工(当初)

表-1 S60.2.21発生、潮位TP+1.9m、波高2.0m(S.M.B法)、風速18m/s

地区 項目	(未設置) 三豊干拓消波工 設置	隣接海岸消波工
越波量 Q	$(8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s})$ 0	$2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$
パラバット天端上の 飛沫上昇高 S_p	$\left(\frac{S_p}{H_0} = 4.0\right)$ 0	$\frac{S_p}{H_0} = 1.5 \sim 2.5$
堤防より陸側への飛沫の 飛散距離 ℓs	(200~250) 0m	50~80m

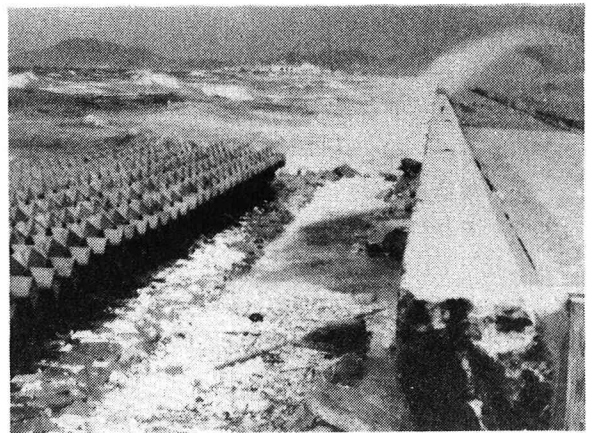


写真-2 三豊干拓消波状況(S60.2.21)

(3) 模型実験と現地観測結果(潮位、実験TP+2.48m・現地+1.9m、波高、実験・現地2.0m、風速、実験24.5m・現地18.0m)

模型実験と現地観測結果を比較してみるとまず消波工未設置の場合には実験では飛沫飛散距離が最大でも $\ell s/H_0=15.0$ を超えることはないが、現地観測では $\ell s/H_0=100\sim125$ となっており、実験と大きな違いを示す。また図-6の消波工設置の場合では $\ell s/H_0=8.5$ 程度を予測していたが現地観測では海水飛沫の陸地内侵入は全くない。また従来形台形断面消波工の2)タイプ設置の隣接海岸では実験より大きな $\ell s/H_0=30$ 程度となっている。この実験と現地観測から見ると図-6の消波工は予測した以上の効果を示したと言える。また隣接海岸の従来形台形断面消波工に比較してもその消波効果は極めて優れていることが確認された。

3. 消波工断面再検討のための予備模型実験と現地観測

上述したように図-6の消波工は模型実験で予測した以上の効果を発揮した。ところがこの消波工は工事費が120万円/mと従来形台形断面消波工の70~90万円/mと比較して高いことから、更に経済的にも従来の消波工と大差なく施工が可能で潮風害防止に効果的な遊水部付緩傾斜消波工の断面を検討した。

(1) 予備実験・試験施工断面の決定

図-6の消波工、捨て石マウンドのみの現地観測で横断幅をもう少し縮小しても消波効果の大幅な低減には至らないと思われたことから図-7の断面で予備実験・試験施工を実施した。予備実験は(株)チスイの協力を得て行った。また試験施工は干拓地排水樋門への波を防止するため将来、その遮蔽域となる排水樋門北側の50m

区間を利用した。図-7の断面の決定根拠は次の通りである。

- 1) 離岸堤の波浪制御効果を考えれば遮蔽域の消波工としてはもう少し断面の縮小が考えられたが、遮蔽域以外の消波工断面の縮小の可能性を探る資料が得られること。
- 2) 緩傾斜部の勾配を(1:7.0)から(1:4.0)と急勾配としているが瀬戸内海のように潮位差が大きな所で断面縮小を図るとすれば止むおえないことであり、このことによって海水飛沫が発生しても図-6の消波工の現地観測から農作物への潮風害が急激に増大するとは思われなかったこと。
- 3) 遊水部は図-6の断面と同じとしているが、これは消波工断面の縮小により波のエネルギーが残ったとしても、水クッションで吸収し、波が堤防に衝突する力を弱め、海水飛沫の発生・飛散を防ぐためのものである。この遊水部の有効性は図-6の捨て石マウンドのみの現地観測で確認されていた。

*工事費は異形ブロックの種類により違いはあるが70~80万円/mとなる。

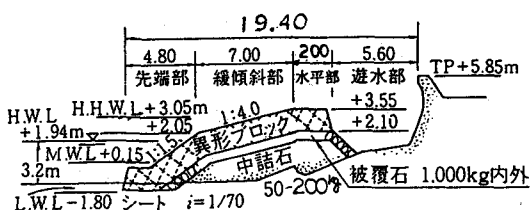


図-7 予備実験・試験施工断面

(2) 予備実験と試験施工の結果について

予備実験は規則波、無風、縮尺1/20で潮位TP+1.94・+3.05m、波高1.5・2.0・2.5mで行なったが

- 1) 潮位TP+1.94mでは水塊は堤内に飛び込んでいないが遊水部の水位上昇は0.60m程になり、海水飛沫は堤内に侵入している。
- 2) 設計潮位TP+3.05mでは進行波は反射波と緩斜面上で衝突・砕波し、水塊がかなり堤内に侵入している。

一方、現地観測(潮位TP+1.8m、波高1.5~2.0m)では波が異形ブロックに衝突した時に海水飛沫の発生・飛散はあるものの、それが堤防天端上を越えることはなく堤内への侵入は全くない。また遊水部の水位上昇も実験の0.60mに比べてほとんどなかった。また潮位TP+1.6m、波高2.0m、周期5secで捨て石マウンドのみの場合には波のエネルギーが遊水部で完全に消失せず堤防を這い上がる傾向が認められた。このため、設計潮位、設計風速、設計波高・周期を考えた場合、農作物へ潮風害が発生することが懸念された。

4. 遊水部付緩傾斜消波工の縮小断面の決定とその現地施工

(1) 実験断面の決定

前述のように図-7の断面を離岸堤の遮蔽域以外のところに設置した場合、設計条件の気象・海象に対処できなく潮風害の発生が予想された。このため、図-8の断面により模型実験を行うこととした。

この断面の図-7との違いは水平部の長さを2.0mから4.0mへと大きくし、設計条件の気象・海象が生じた場合に対処したことである。

これは図-7の消波工・捨て石マウンドのみの現地観測から設計潮高位付近に潮位が上昇した場合、水平部が2.0mでは当初断面に比して急速に波浪制御効果が減少し、農作物に潮風害が発生することが予想されたためである。

(2) 模型実験

模型実験は規則波、無風、縮尺1/20で実験のケースは表-1に示す通りである。

この実験では越波量、打ち上げ高、遊水部の水位上昇高、波の作用高、パラベット天端上の飛沫上昇高さ、堤内への飛沫飛散距離を測定したが、その測定結果は表-2に示すような値となった。

*工事費は異形ブロックの種類により、違いはあるものの80~90万円/mである。

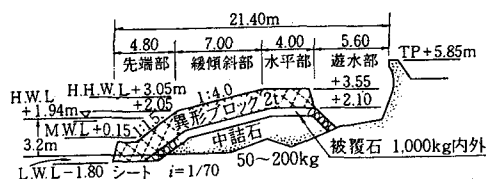


図-8 遊水部付緩傾斜消波工(縮小断面)

表-1 実験のケース

CASE	H ₀	T	潮位	断面形状
1-1-1	1.5 (m)	(sec) 5.0	W.L +1.60m	捨石マウンド
-2	2.0			
1-2-1	1.5	5.0	H.W.L +1.94m	
-2	2.0			
2-1-1	1.5	5.0	W.L +1.6m	捨石マウンド + 消波ブロック
-2	2.0			
2-2-1	1.5	5.0	H.W.L +1.94m	
-2	2.0			
2-3-1	2.0	6.0	H.H.W.L+3.05m	
-2	2.5			

注) H₀ = 2.0m波 (H.H.W.L+3.05mを除く) については、非砕波、砕波の2種の波を作用させた。

表-2 実験結果

CASE	H ₀ (m)	T (sec)	潮位 (m)	断面形状	越波量 (m ³ /m/s)	打上げ高 Ru (m)	水位上昇 η (m)	波の作用 高 η* (m)	飛沫高さ Sp (m)	飛散距離 ls (m)
1-1-1	1.5	5.0	W.L +1.60m	捨石 マウンド	0.0	1.04	0.74	1.00	1.95	15.6
-2	2.0				0.0	1.36	0.82	1.90	3.25	21.4
-2'	2.0				0.0	1.44	0.78	1.60	2.40	18.0
1-2-1	1.5				0.0	1.28	0.55	1.30	4.25	17.2
-2	2.0	5.0	H.W.L +1.94m	捨石 マウンド	0.0	1.64	0.67	1.70	5.05	23.8
-2'	2.0				0.0	1.70	0.65	1.60	2.25	17.4
2-1-1	1.5				0.0	0.44	0.36	2.25	3.20	2.0
-2	2.0				0.0	0.54	0.46	2.75	4.40	10.8
-2'	2.0	5.0	H.W.L +1.94m	+ 消波 ブロック	0.0	0.60	0.48	2.75	4.20	13.8
2-2-1	1.5				0.0	0.52	0.40	2.40	3.20	2.8
-2	2.0				0.0	0.78	0.59	2.90	5.50	16.8
-2'	2.0				0.0	0.62	0.52	2.90	4.00	7.4
2-3-1	2.0	6.0	H.H.W.L +3.05m		1.28×10 ⁻⁴	4.00	0.77	0.77	8.20	18.6
-2	2.5				1.70×10 ⁻⁴	4.60	1.02	1.02	9.20	21.8

これによると測定可能な越波量は設計高潮位 TP + 3.05 m のみで $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{m} / \text{s}$ となっている。これは通常の許容越波量の基準は満たしているものの農作物への潮風害は発生する水準である。また堤内への飛沫飛散距離は実験が無風にもかかわらず 2.0 ~ 23.8 m と大きな値となっている。そして遊水部の波浪エネルギー吸収作用も実験では顕著な効果が見られない。

写真-3 は捨て石マウンドの写真-4 は捨て石マウンド+消波ブロックの実験状況を示している。この写真では捨て石マウンドのみでも顕著な飛沫発生が見られ、また遊水部の水位上昇も写真-3 で 0.74 m 写真-4 で 0.59 m と非常に大きなものとなっている。

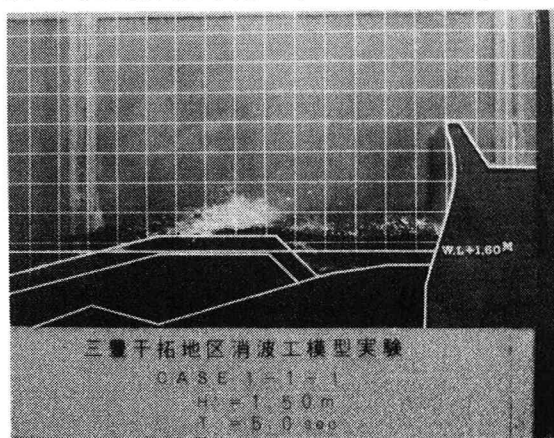


写真-3 捨て石マウンドの実験状況

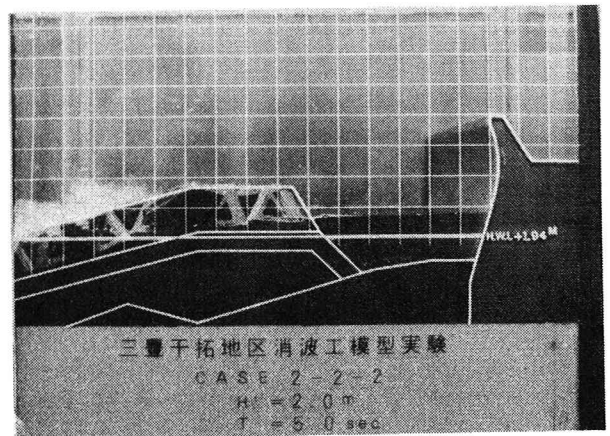


写真-4 捨て石マウンド+消波ブロックの実験状況

この結果から判断する限り、図-8の断面で遮蔽域以外の干拓堤防前面に消波工を設置した場合、農作物への潮風害が懸念された。ところが

- 1) 試験施工においては予備実験と異なり、海水飛沫の堤内侵入はないこと。
- 2) 現地施工の遊水部付緩傾斜消波工では水位上昇がほとんどなく、ウォータクッションによる波のエネルギー減殺が期待できること。
- 3) 設計高潮位 TP + 3.05 m では予備実験の天端幅 2.0 m に対して本実験の天端幅 4.0 m では堤防を這い上がる量が少なく、天端幅を拡幅した効果が見られること。

以上の理由から遊水部付緩傾斜消波工の遮蔽域以外の縮小断面として図-8の断面を現地施工することとした。

(3) 縮小断面の現地施工と潮風害防止効果

図-8の断面により平成元年から現地施工を開始した。この断面の波浪制御状況を写真-5・6に示す。5は潮位 TP + 1.6 m、波高 1.5 m で捨て石マウンドのみの状況であるが砕波現象、遊水部の水位上昇 0.1 m (実験 0.74)、飛沫のパラペット天端上の高さ 0 m (1.95)、堤内への飛沫飛散距離 0 m (15.6) 等が実験と大きく異なる。また6は潮位 TP + 1.94 m、波高 2.0 m で捨て石マウンド+消波ブロックの消波状況であるが、これも実験と異なり、海水飛沫の堤内侵入はまったくなく、農作物に潮風害は発生していない。

*波高は風速記録から、S. M. B法で求めた。(潮位・風速の観測位置は図-5に表示)



写真-5 捨て石マウンドの現地消波状況



写真-6 捨て石+消波ブロックの現地消波状況

5. 越波現象における規則波模型実験と現地観測の相違点について

三豊干拓消波工の当初断面を決めるための模型実験、更に経済的な断面を再検討するための予備実験、本実験と各断面が現場施工された昭和58年度以降の隣接海岸の従来形台形断面消波工と遊水部付緩傾斜消波工の現地観測から筆者は越波現象をフルード相似則に基づいた模型実験で求めるのは困難であると考えている。

その理由は次の通りである。

- 1) 図-1、写真-1でわかるように従来形台形断面消波工では消波機構そのものが模型実験と現地では異なるため、実験で求めた越波量・飛沫飛散距離等は意味がない。
- 2) 写真-2～5でもわかるように遊水部付緩傾斜消波工でも模型実験では異形ブロック衝突時の飛沫発生・飛散状況を表現できないため、実験が無風にもかかわらず現地に比較して過大な飛沫上昇高・飛散距離を与えている。また実験では遊水部の水位上昇が著しく、これが設計高潮位付近では現地と全く異なる消波機構をしめす原因となっている。

この原因としてはまず第一に粘性の影響が考えられる。模型実験のフルード則による実験波速では粘性の影響が現れ、反射波や小水塊・飛沫の発生を現地より少なくしている。第二の原因としては模型実験による粒状飛沫と現地の雨滴大飛沫との関係が不明確であることが考えられる。縮小断面の遊水部付緩傾斜消波工の本実験では堤防背面に幅55cmの合板を敷き、その表面に付着した1mm以下の飛沫も目視して求めたため、飛散距離が過大となった。また第三の原因としては実験波・異形ブロックの透過性の問題が考えられる。遊水部付緩傾斜消波工の模型実験において遊水部の水位上昇が現地より非常に大きくなっているのは実験が規則波で二次元模型であるため、現地の三次元的な不規則波より、遊水部への質量輸送が多くなっていること、また実験では異形ブロックの透過性が現地より、相対的に小さくなっていることにより、遊水部への流入量が流出量より多くなっており、現地に比べて過大な水位上昇を起こしていると考えられる。第四の原因は実験風速の問題である。衆知のように砕波・越波現象の模型実験にどのような風速を与えて良いかが明らかになっていないため、これが大きく影響する越波現象の現地再現性を困難としている。

6. おわりに

香川県の三豊干拓地で設置された消波工の一連の模型実験と現地観測で明らかになった砕波・越波現象の実験と観測の相違点についてのべた。その主な結論は砕波・越波現象の実験による現地再現は非常に困難であるため、実験によって構造物を築造した場合、施工後の現地観測により実現象を確認し、問題があれば再検討をする必要があるということである。現在、海岸で消波工を設置する場合、設計の標準として使用されている海岸保全施設築造基準解説のP176の3・2・6・7の消波工に示す表-3・2・7の消波工の諸元の標準は実験的研究成果として作成されたもので、その使命をほとんど終えている。筆者には早急な改定が必要であると思える。

参考文献

- 1) 玉井佐一：三豊干拓模型実験報告書(昭和56年3月)
- 2) (株)チスイ：三豊干拓堤防消波施設水理模型実験報告書(昭和63年10月)
- 3) (株)日本港湾コンサルタント：三豊干拓地区消波工模型実験報告書(平成元年8月)
- 4) 杉浦国男・樋元健良：第45回農業土木学会中国・四国支部講演要旨pp138~146(平成2年10月)