

護岸の洗掘被災特性

DAMAGE CHARACTERISTICS OF SEA WALLS DUE TO SCORING

高山知司¹・間瀬 肇²・安田誠宏³・井上雅夫⁴

Tomotsuka TAKAYAMA, Hajime MASE, Tomohiro YASUDA and Masao INOUE

¹フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学防災研究所 助教授

³学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科

⁴正会員 工博 関西大学工学部 土木工学科 教授 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

The large number of coastal and port structures has been damaged by severe marine climates. Sea bed scoring at the foot of coastal structures such as sea walls is one of the main causes of damages and more than 50% of damaged sea walls is caused by it. The damaged sea walls are selected from the annual books of damaged facilities edited by Port Bureau of Ministry of Transport. Though the wave conditions at the damage are generally described, they are estimated by SMB method for the case without wave descriptions. The stone piled type vertical sea walls are likely to be entirely damaged by scoring, but blocked type ones are only damaged partly. Once the sea bed had been scored, incident waves are increased due to deepened with depth. Consequently, wave forces or wave overtopping become more severe. The required block weight calculated by Hudson's formula also increases. Therefore the countermeasures against scoring should be established immediately.

Key Words : Scoring, sea wall, wave overtopping, required block weight, Hudson's formula

1. まえがき

我が国における海岸防護施設の約95%は護岸や堤防である。これらの被災原因を大きく分類すると、波力、越波および洗掘に分けられる。高山ら¹⁾によると、被災原因のうち護岸前面の洗掘による被災事例が最も多く、被災護岸の半数以上を占めているという結果が得られている。このことは、洗掘に対する対策が、現状ではまだ十分ではないことを意味しており、効果的な洗掘対策を早急に確立する必要があるといえる。

そこで本研究では、洗掘によって被災した護岸の被災事例について、波浪と被災形態との関係を定量的に検討するとともに、その被災特性を明らかにしようとした。さらに、各種護岸の構造形式別の被災原因や被災過程を詳細に検討した。

2. 被災事例資料とその分類

運輸省港湾局は、被災した海岸・港湾構造物について被災場所、被災形態、復旧方法などをとりまとめて、「港湾・海岸構造物被災施設集覧」を作成し

ている。過去5年間(1992~1996年度)の被災施設集覧の中から、洗掘によって被災したと記載されているもの108件を抽出した。この被災施設集覧に記載されている、被災時の海気象条件、被災状況の写真および断面図などから、護岸の被災形態をその構造形式ごとに分類した。

護岸形式としては、急傾斜の護岸を含めて直立護岸、護岸前面に消波工が設置されているものを消波護岸、法面が緩勾配の護岸を緩傾斜護岸、階段状のものを階段護岸とした。さらに、「海岸保全施設築造基準解説」²⁾に基づき、直立護岸の構造形式を石積式、重力式、扶壁式、ブロック積式および高マウンド型に、消波護岸を直前面に消波工があるもの、消波工が離れているものおよび消波堤に、それぞれ分類した。

また、護岸の被災状況から、鹿島ら³⁾の分類を参考に、被災形態を本体の滑動、沈下および破壊、被覆工、捨石、根固め工および消波工の被災、洗掘、水叩きの損傷、裏込め土の流出、その他の11通りに分類した。

被災時の波浪条件が記載されているものはそれを用い、不明なものについては風速と吹送距離を用いて、SMB法によって被災時の波を推定した。このよ

うにして得た波を用いて、波力、越波流量、捨石およびブロックの所要重量などを求め、被災原因を詳細に検討した。

3. 洗掘被災事例の統計解析

(1) 洗掘被災護岸の統計

図-1は、運輸省管轄の護岸について、総延長の割合を示したものである。最も多いのは直立護岸で1590km(82%)、次いで消波護岸の190km(10%)、緩傾斜・階段護岸は150km(8%)である。

図-2は、洗掘により被災した護岸108例を護岸形式別に分類したものである。これによると、直立護岸が40例で37%、消波護岸が52例で48%、緩傾斜・階段護岸が6例で6%である。したがって、実際に施工されている護岸の割合からすれば、直立護岸は施設延長が長い割には被災件数が少なく、被災規模や被災形態を考慮しなければ、比較的被災しにくいとも考えられる。

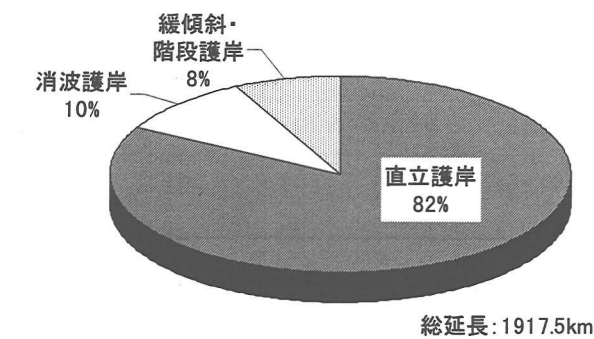


図-1 運輸海岸における実際の護岸の割合

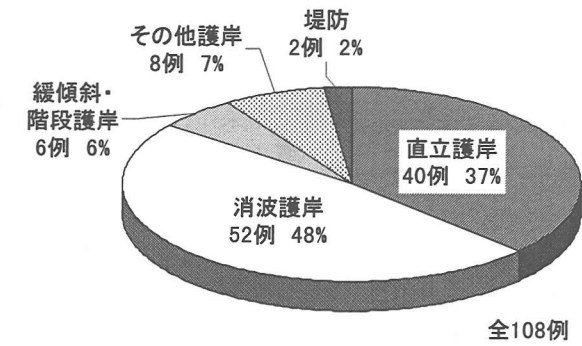


図-2 洗掘により被災した護岸形式の割合

(2) 護岸形式別被災特性

図-3は、直立護岸について、その構造形式の割合を示したものである。これによると、石積式のものが最も多く40%であり、さらにその80%が全破損しており、洗掘により非常に被災しやすい形式であるといえる。これは、石積式は一箇所が破損すると全体の破壊に結びつきやすい構造であるためと考えられる。さらに、図-4に示す被災形態を見ると、石積式護岸の多くは、洗掘と越波による裏込め土の吸出し

が複合的に起きて、本体の倒壊に至ったことがわかる。なお、その他の構造形式のものは、被覆工や捨石の散乱など、波力も作用していると考えられる被災形態や、水叩きの損傷、裏込め土の流出など越波により被災したと考えられるものもあるが、いずれも部分破損が80%以上を占め、背後地が大きな被害を受けることは少ない。

消波護岸についても、直立護岸の場合と同様にその構造形式の割合を図-5に示した。前面消波工護岸が最も多く22例で42%であり、以下、離れ消波工護岸とパラペット後退型のもの、背後に傾斜護岸があるもの、消波堤である。なお、いずれの形式のものも、直立護岸の場合とは異なり、全破損には至っていない。さらに、被災形態については、図-6に示すように消波工や根固工が被災したものが多く、本体が破壊されることはない。また、水叩きの損傷および裏込め土の流出が多いが、護岸の余裕地・端高は十分であり、算定した越波流量も小さいため、越波によって被災したとは考えにくい。したがって、これらの場合には、消波ブロック下部の地盤が洗掘さ

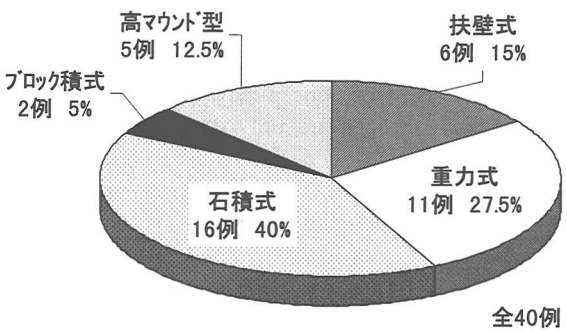


図-3 直立護岸の構造形式の割合

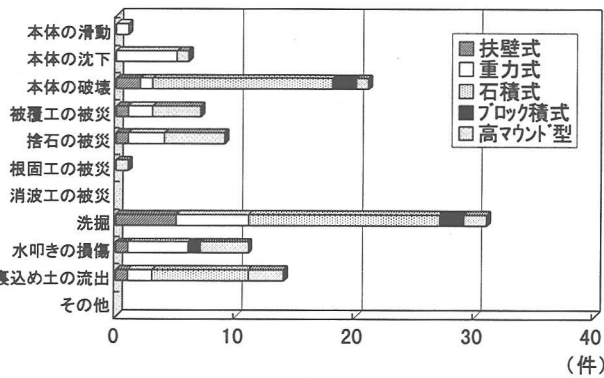


図-4 直立護岸の被災形態

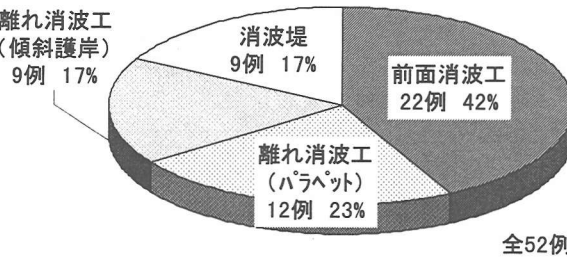


図-5 消波護岸の構造形式の割合

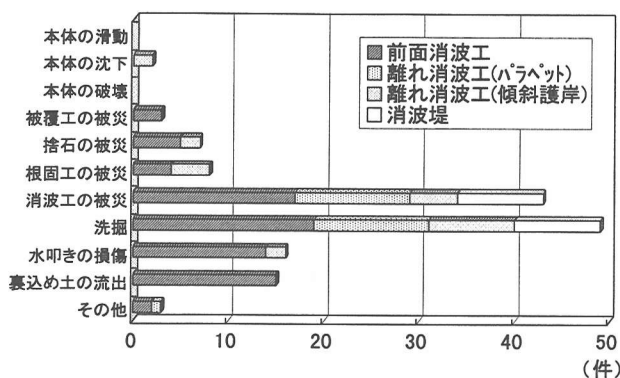


図-6 消波護岸の被災形態

れ、護岸下部から裏込め土の吸出しを受けたために、水叩きが沈下して損傷したものと考えられる。

4. 被災原因

(1) 越波

図-7および8は、合田⁴⁾による越波流量推定図を用いて求めた、被災時の越波流量と沖波波高との関係を示したものである。これらによると、直立護岸、消波護岸のいずれについても、護岸天端高と沖波波高との比 h_c/H_0 が0.5以下であると、越波流量は $0.1(\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s})$ 以上と非常に大きくなって、越波によっても被災したものと考えられる。また、 h_c/H_0 が0.5~1.5のものをみると、直立護岸の場合には入射波高が小さくても、越波流量が大きくて被災していると考えられるものがある。これは、被災時の最高潮位が設計潮位よりもかなり高く、護岸の余裕天端高が小さくなったためであり、さらに、護岸前面の勾配が急であることも理由のひとつと考えられる。しかし、消波護岸ではこのような被災事例はなく、越波で被災したとみられるものは、波高が大きい場合だけである。

(2) 波力

Hudson公式⁵⁾を用いて消波ブロックの所要重量を算定し、被災護岸のブロック重量と比較した。なお、Hudsonの式は次式で表される。

$$W = \frac{\gamma_r H_{1/3}^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

ここに、 W : 捨石またはコンクリートブロックの所要重量(tf)、 γ_r : 石またはブロックの空中単位体積重量(tf/m³)、 S_r : 石またはブロックの海水に対する比重、 α : 傾斜面が水平面となす角度、 $H_{1/3}$: 設計有義波高(m)、 K_D : 被覆材および被害率等によって定まる係数である。

また、本論文では安定係数 K_D 値としてC.E.R.C.⁶⁾

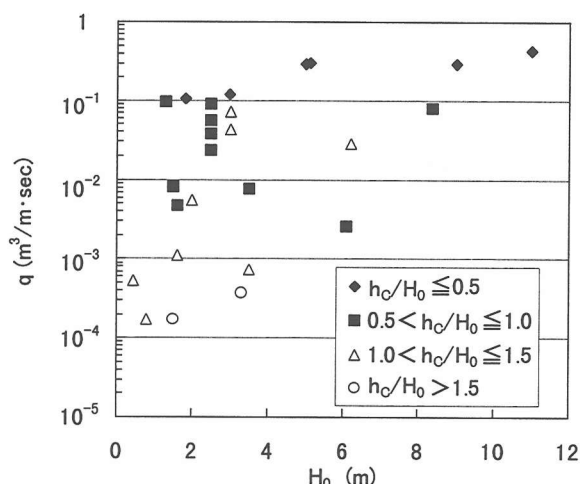


図-7 越波流量と沖波波高との関係(直立護岸)

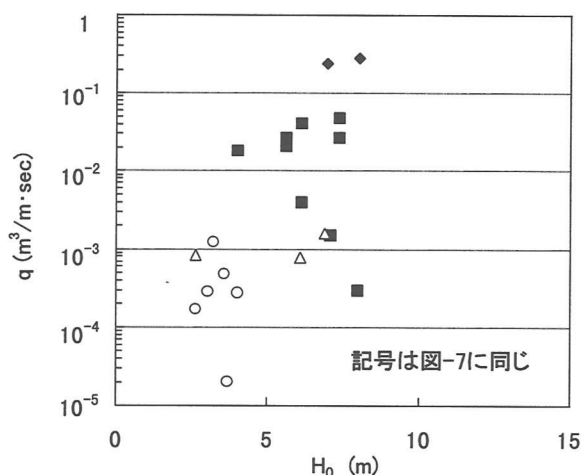


図-8 越波流量と沖波波高との関係(消波護岸)

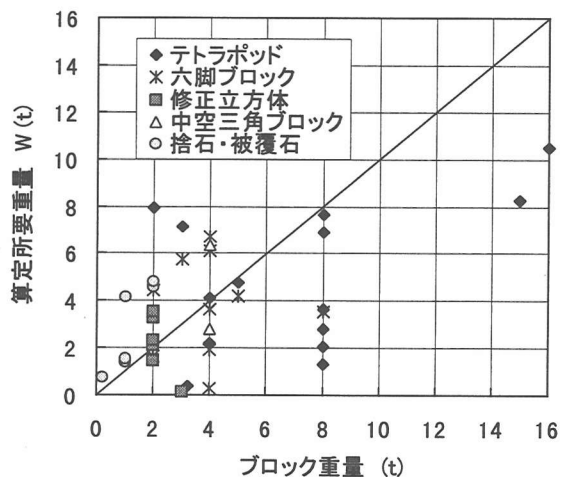


図-9 消波ブロックの所要重量

による提案値と、我が国の港湾工事における実績値を用いた。

被災時のブロック重量と算定した所要重量を比較した結果を図-9に示す。これによると、捨石および被覆石はいずれも算定した所要重量以下である。重量が2~4tの軽い消波ブロックは、算定した所要重量より軽いため、波力により散乱したものと考えら

れる。また、8tより重い消波ブロックは所要重量以上であり、ブロックの重量不足というよりもむしろ、基礎や根固めが洗掘されて沈下が生じ、被災したものと考えられる。

(3) 護岸形式別被災原因

直立護岸の被災原因としては、図-10に示すように洗掘だけの場合と、洗掘と越波が複合している場合が多い。

図-11に直立護岸の構造形式別の被災原因を示す。これによると、重力式の場合には、洗掘以外にも越波や浸食、圧密沈下など様々な原因によって被災している。石積式の場合には、洗掘だけや洗掘と越波が複合している場合がほとんどであるが、波力や越波が原因のものも若干みられる。また、扶壁式の場合には、洗掘が原因と考えられる場合が多く、高マウンド型の場合には、洗掘と越波が複合している場合が多いが、事例数が少ないため、その特性は明らかでない。さらに、ブロック積式の場合には2例しかないが、いずれも洗掘が原因と考えられる。

消波護岸については、図-12に示すように洗掘だけの場合と、洗掘と波力が複合している場合がほとんどである。したがって、消波護岸の場合には、地盤が洗掘されて消波ブロックが沈下するような被災と、波力によってブロックが飛散する被災が多いといえる。

さらに、図-13に構造形式別の被災原因を示す。これによると、前面消波工護岸、離れ消波工と傾斜護岸のものおよび消波堤では、洗掘だけの場合が多く、洗掘と波力が複合して起きている場合も若干ある。しかし、離れ消波工とパラペット後退型の場合

には、洗掘と波力によって被災したものがかなり多い。これは、設置水深が深いため波高が大きく、消波ブロックの重量も軽いものも多かったためである。

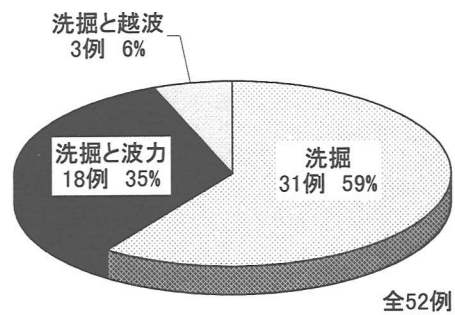


図-12 被災原因の割合 (消波護岸)

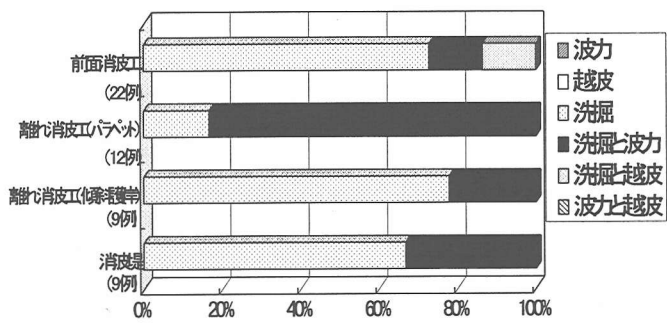


図-13 構造形式別の被災原因 (消波護岸)

5. 越波およびブロック重量に及ぼす洗掘の影響

(1) 水深増大

洗掘によって被災した場合、護岸前面の水深が増大するため、波高は大きくなると考えられる。そして、その波高増大は、越波流量などにも影響を及ぼすと考えられる。そこで、洗掘によって水深が増大した場合に、波高や越波流量がどれだけ増大するかについて検討した。

図-14は直立護岸の前面が洗掘され、水深が0.25

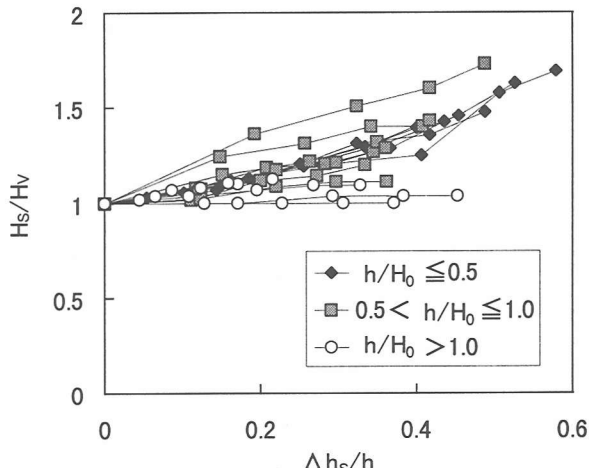


図-14 堤前波高の増大割合と洗掘深との関係

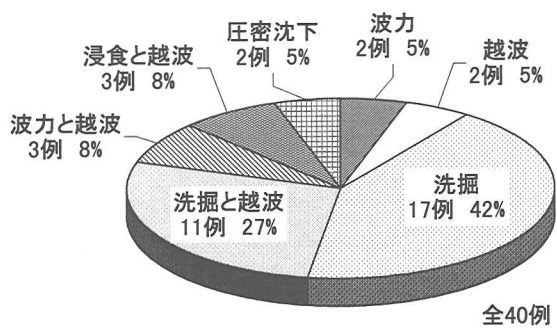


図-10 被災原因の割合 (直立護岸)

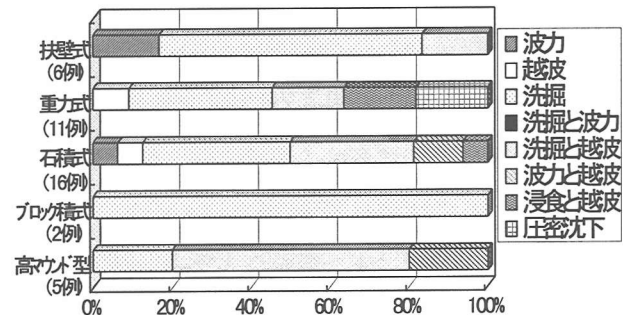


図-11 構造形式別の被災原因 (直立護岸)

～1.0m増大した場合の、堤前波高の増大する割合を求めたものである。縦軸は洗掘されていない場合の波高 H_V と洗掘された後の波高 H_S との比、 H_S/H_V であり、横軸は洗掘深 Δh_s と前面水深 h との比、 $\Delta h_s/h$ である。これによると、 h/H_0 が1.0よりも大きい場合には、洗掘深が大きくなっても波高はほとんど増大しない。 h/H_0 が1.0以下の場合については、 $\Delta h_s/h$ が小さいときには、洗掘による影響はそれほど大きくはない。しかし、 $\Delta h_s/h$ が大きくなると、波高はかなり増大し、洗掘されていない場合の1.5倍以上になる場合もある。

図-15は、護岸前面が洗掘された場合の、越波流量の増大する割合と洗掘深との関係を示したものである。縦軸は洗掘されていない場合の越波流量 q_v と洗掘後の越波流量 q_s との比、 q_s/q_v である。これによると、 h/H_0 が0.5以下のものの増大割合がかなり大きく、洗掘によって越波流量は非常に大きくなる。また、 h/H_0 が0.5よりも大きい場合には、洗掘深が0.5mまでは、越波流量はあまり増大しない。しかし、洗掘深が1.0mになると、洗掘されない場合の2～3倍になる場合もあるため、 h/H_0 が小さいときと同様に注意が必要である。

また、護岸前面が洗掘されたことによって、護岸が沈下する被災事例もみられたため、0.5m洗掘された状態で、さらに護岸が0.1mおよび0.2m沈下した場合について、越波流量の増大する割合を求め、それらを図-16に示した。これによると、いずれの場合においても、護岸が沈下すると越波流量が増大することは明らかである。 h/H_0 が0.5以下の場合には、洗掘によって越波流量はかなり増大する。さらに、護岸の沈下によっても増大するが、その割合はあまり大きくない。また、 h/H_0 が0.5よりも大きい場合には、沈下量が0.1m程度では、越波流量はほとんど増大しないが、0.2mになるとかなり大きくなる。

以上のように、洗掘によって水深が増大し、さらに護岸の沈下が生じると、越波流量が大きくなることは明らかであり、特に前面水深が浅い場合には、洗掘が生じないように対策をとることが重要となる。

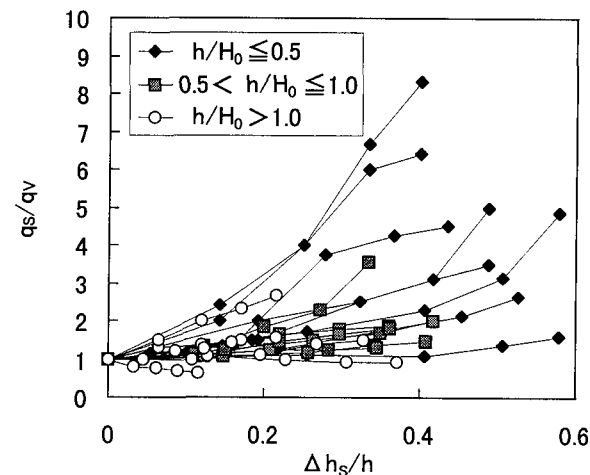


図-15 越波流量の増大割合と洗掘深との関係

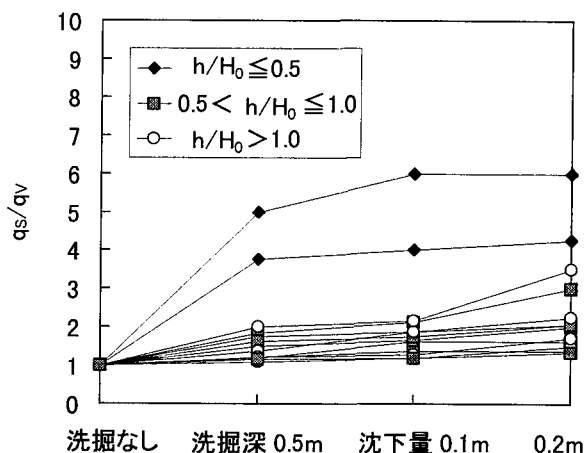


図-16 越波流量の増大割合と洗掘深との関係
(沈下が生じた場合)

(2) 消波ブロックの沈下および散乱

消波護岸の被災過程としては、重量不足による消波ブロックの散乱だけでなく、ブロックの所要重量が足りているにもかかわらず、地盤の洗掘によって消波ブロックが沈下している事例も多くみられた。こうした消波ブロックの沈下は、護岸の消波機能を著しく低下させるといえる。そこで、沈下による消波護岸の機能低下、特に越波防止機能の低下について検討した。なお、消波ブロックが沈下した場合の越波流量は、高山ら⁷⁾によって提案されている、直立護岸の越波流量算定式と、消波護岸および一部ブロック積み消波護岸の換算天端高係数を用いて求めた。

図-17は沈下後の消波ブロックの高さと越波流量の増大する割合との関係を示したものである。縦軸は消波ブロック沈下後の越波流量 q_s と被災前の消波ブロックの高さにおける越波流量 q_b との比、 q_s/q_b であり、横軸は消波ブロックが沈下および散乱した場合の高さ h_s と被災前の消波ブロックの高さ h_b との比、 h_s/h_b である。これによると、 h_c/H_0 が0.5以下の場合には、越波流量は大きい、その増大する割合は小

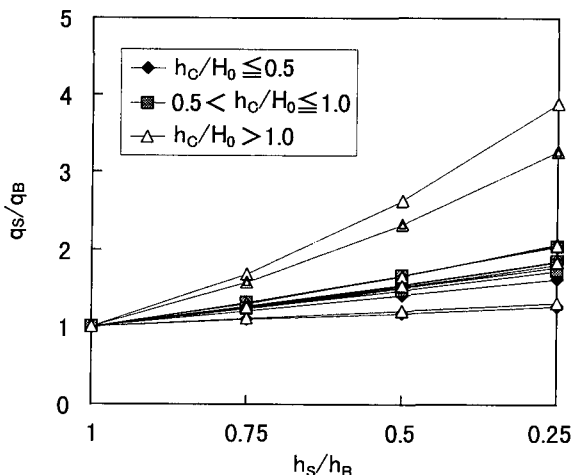


図-17 沈下後の消波ブロックの高さと越波流量の増大割合との関係

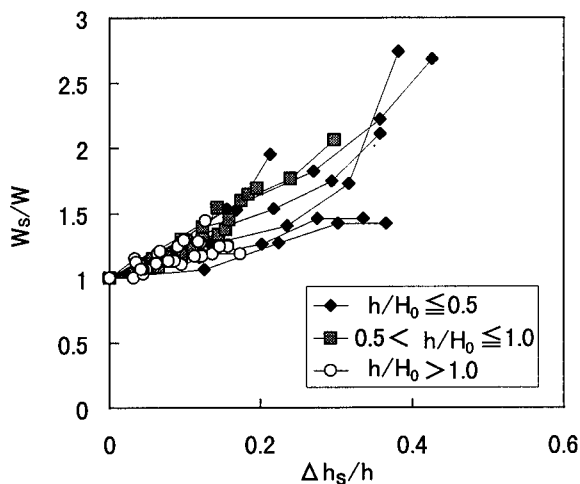


図-18 消波ブロックの所要重量の増大割合と洗掘深との関係

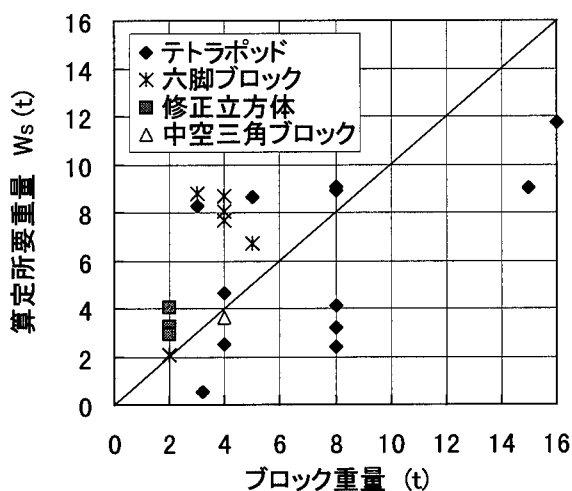


図-19 消波ブロックの所要重量 (洗掘深 0.5mの場合)

さい。逆に、 h_0/H_0 が1.0よりも大きい場合には、越波流量は小さいが、その増大する割合がかなり大きくなるものがある。図-15に示した、洗掘による水深の増大が越波流量に及ぼす影響に比べると、消波ブロックの沈下による影響はそれほど大きくはない。

また、前面洗掘による波高増大に伴い、消波ブロックは波力によって散乱しやすくなるものと考えられる。消波ブロックの所要重量は、式(1)に示したHudson公式によって求めることができ、ブロックの所要重量 W は波高 H の3乗に比例する。そこで、堤前波高の増大割合から、消波ブロックの所要重量の増大する割合を求め、それらを図-18に示した。縦軸は洗掘されていない場合の所要重量 W と洗掘後の所要重量 W_s との比、 W_s/W である。これによると、洗掘深が増大するにつれて、ブロック所要重量はかなり大きくなる。さらに、 h/H_0 が大きくなるにつれて、所要重量が増大する割合も大きくなり、洗掘されていない場合の2～3倍になるものもある。

さらに、図-19は図-9中の一部の被災事例について、前面が0.5m洗掘されたと仮定して来襲波高の増大を算定し、ブロックの所要重量を再度算定したも

のである。これによると、被災時のブロック重量が軽いものほど所要重量は大きくなり、重量不足によって散乱する可能性も高くなることがわかる。また、0.5mの洗掘によって、図-9では所要重量とほぼ等しい重量であった消波ブロックも、重量不足となることがわかった。しかし、ブロックの重量がかなり重い場合には洗掘深が増大しても、所要重量はそれほど大きくはならない。

6. あとがき

本論文における主要な結果をまとめると次のようである。

- 1) 被災した直立護岸の構造形式の割合は、石積式のものが多い。そのほとんどが全破損していた。
- 2) 消波護岸の被災形態は、消波工および根固工の散乱や沈下が多く、本体が破壊されることはなかった。
- 3) 洗掘によって被災した護岸の被災原因としては、直立護岸の場合には、洗掘と越波が複合したものが多い。消波護岸の場合には、洗掘による消波ブロックの沈下と、波力による消波ブロックの散乱が多い。
- 4) 直立護岸について、洗掘深が増大すると、堤前波高および越波流量はかなり増大し、水深・波高比が小さいものほど、その増大する割合は大きくなる。
- 5) 消波護岸の場合には、洗掘によって消波ブロックが沈下すると越波流量は増大し、護岸天端高と沖波波高の比が大きいものほど、増大する割合は大きくなる。さらに、前面が洗掘されることによって、ブロックの所要重量は大きくなり、所要重量とほぼ等しかったブロックも重量不足となる。

謝辞：最後に、貴重な資料を提供していただいた運輸省港湾局海岸・防災課の関係者に謝意を表する。

参考文献

- 1) 高山知司, 間瀬 肇, 山田雅彦: 護岸被災事例の統計的解析, 海洋開発論文集, Vol.14, pp.179-184, 1998.
- 2) 海岸保全施設築造基準連絡協議会: 改訂 海岸保全施設築造基準解説, pp.182-190, 1987.
- 3) 鹿島遼一, 今泉正次, 戸田泰和: 被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.626-630, 1986.
- 4) 合田良実, 岸良安治, 神山 豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 運輸省港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp.3-44, 1975.
- 5) Hudson, R. Y.: Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol.85, W.W.3, pp.93-121, 1959.
- 6) Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers: Shore Protection Manual, Vol.IV, pp.7-202-242, 1984.
- 7) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp.151-205, 1982.

(1999.4.19受付)