

防波堤の被災特性に関する統計解析

STATISTICAL ANALYSIS ON DAMAGE CHARACTERISTICS OF BREAKWATERS

高山知司¹・東良宏二郎²

Tomotsuka TAKAYAMA, Koujiro HIGASHIRA

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学生員 京都大学 工学部 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Breakwaters are very important to keep harbors calm. However, they have been severely damaged quite often since they are directly exposed to large waves from open sea. Port and Harbor Research Institute of Ministry of Transport edited four volumes of damaged breakwaters, and published them as technical reports. The present paper investigates the characteristics of damaged breakwater referring to the technical reports and statistically derives main factors closely related to the damages. It was founded that aspect ratio of a casson, and horizontal wave force ratio to weight of the casson show close relationship with breakwaters damage modes.

Key Words : breakwater, aspect ratio, wave pressure, type of displacement

1. はじめに

防波堤は、外洋からの波を遮蔽して港内を静穏に保ち、船舶の航行や停泊、係留船舶の荷役を安全に、また円滑に行うことができるようにするために港口部に建設される構造物である。このような防波堤は、外洋からの波に直接晒されるため、現在までに非常に多くの被災を受けてきた。そこで、防波堤の設計精度を向上させるために、現在、堤体の期待滑動量に基づいた信頼性設計法が検討されている。

この設計法は、ひとつの設計波に対する波力と堤体自重による抵抗力との釣り合い式に基づく、堤体の安定・不安定の判断だけでなく、耐用期間中に発生するすべての異常時波浪に対する堤体の変形量(滑動量)を考慮する設計法である。しかしながら、実際の防波堤の被災を調べてみると、単に水平に滑動被災を起こしているものだけでなく、傾斜した状態で滑動しているもの、滑動せずに回転しているもの、あるいは転倒しているものなど非常に複雑な被災形態となっている¹⁾。防波堤の信頼性設計の精度を向上させるためには、これらの複雑な被災特性も考慮することが重要となってきている。そこで、本研究においては、防波堤の被災事例を調べて被災形態を分類し、そのような被災形態が起きる頻度や条件を検討している。

2. 被災事例資料とその分類

(1) 用いた被災事例資料

旧運輸省港湾技術研究所(現国土交通省総合政策研究所)は、防波堤の被災状況や被災時の海気象状況、復旧方法に関してとりまとめを行い、被災防波堤集覧として4巻を既に発行している。これは災害復旧工事記録、手戻り工事記録のなかから、被災例を抽出し、それらについての資料をまとめて記載したものである。記載する被災例の基準は各巻ごとに異なり、全ての被災例が記述されているわけではない。しかしながら、防波堤の被災特性を調べるには十分な資料であると判断した。各巻の記載基準を以下に示す。

第1巻²⁾ 1949年から1964年に被災した防波堤のうち、国が直轄で災害復旧工事を行ったもの及びその港で施工中に被災したもののなかから比較的資料のそろっている被災例68個を抽出して記載している。ただし北海道については被災件数が多いので主な港、7港についての被災例から抽出している。

第2巻³⁾ 1965年から1972年に被災した防波堤のうち、復旧予定金額が三千万円以上のもの及び施工中に被災した防波堤のうち国

が復旧工事（直轄手戻り工事）を行った防波堤で被災時に本体に移動または破壊があったものから比較的資料のそろっている被災例63個を抽出して記載した。

第3巻⁴⁾ 1973年から1982年に被災した防波堤のうち、復旧予定金額が三千万円以上のもの中から比較的資料のそろっている例を抽出し、また施工中に被災した防波堤のうち直轄で手戻り工事が行われたもののほぼ全てを加えて被災例54個を記載した。

第4巻⁵⁾ 1983年から1991年に被災した防波堤のうち以下のいずれかの条件に該当する被災例69個を抽出して記載した。

1. 復旧工事金額が二億円以上のもの
2. 直轄で復旧工事を行ったもの
3. 構造形式が混成堤で被災時に本体部の滑動がみられたもの

(2)被災事例分類

被災防波堤集覧の記載内容に基づいて、本研究では防波堤の種類と被災原因、被災形態を以下のように分類した。

a)防波堤の種類

構造形式により直立堤と混成堤、傾斜堤、その他に分け、さらに堤体を構成している材料によってケーソン式、ブロック式、捨石式、捨ブロック式などに分けた。また構造・材料が同じ防波堤でも消波工被覆の有無により分類した。

b)被災原因

防波堤の機能が大きく失われることはない被災を、長期間にわたって受けたことによって施設が変形したり、状態が変化したりして、過去の被災履歴によって被災したという可能性もある。しかしながら、このことを推定することは非常に困難である。そこで短期的な原因（異常気象、地震、融雪による洪水など）のみを考え、台風または熱帯低気圧によるもの、冬期風によるもの、温帯低気圧によるもの、その他の4つに分類した。

各気象には以下のような特徴がある。

台風は熱帯低気圧のうち中心付近の最大風速が17.2m/s以上のものであり、台風の東側で特に風が強い。中心気圧も低く、中心付近では海面が吸い上げられて高潮が発生する。

冬期風は西高東低の冬型の気圧配置により吹く季節風である。台風や低気圧は速く移動するのに対し、季節風は同じ気圧配置が長期間持続する傾向が強く、風が長時間吹き続けるので、冬期風によって発生する波は継続時間が長い。

温帯低気圧は南北の温度差によって渦が発生、発達したもので東側では暖気が北上し西側では寒気が南下している。上空の強い西風に伴って速く移動するので波の継続時間は短い。

ただし、冬期においては低気圧と冬期風の判別が

困難であるため、被災日前後に被災港に影響を与えたと考えられる低気圧が存在し、それによって被災港の近海で風浪が発達したという記述がある場合には、低気圧とし、そのような低気圧が存在せず、気圧配置による風浪であると判断できる場合には冬期風とした。

(c)被災形態

被災防波堤集覧の被災状態に関する記述と被災前後の断面図から被災形態を以下のように7つに分類した。

直立部の変位

防波堤直立部が波力により、被災前後で大きく変位した場合である。ただし基礎捨石の洗掘・流出によって傾斜した場合は直立部の変位とは考えなかった。

直立部の破壊

直立部の亀裂、破損など、直立部が被害を受けた場合である。またブロック式防波堤において本体を構成するブロックが抜け出したり、飛散したりする被災も直立部の破壊に含めた。

上部工の破壊

上部コンクリートの剥離や飛散パラペット部の滑動、飛散、破壊など堤体の上部構造物が被災した場合である。

被覆工の被災

大割石やコンクリートブロック、異形ブロックなど捨石部表面を被覆しているものが、散乱、移動した場合である。

基礎工の被災

混成堤の基礎をなす捨石が、流出、散乱した場合である。

根固工の被災

粗石やコンクリートブロック、異形ブロックなど堤体前後趾の洗掘を防止する目的で設置されているものが、散乱、移動した場合である。

消波工の被災

波力の低減を目的として、粗石や異形ブロックなど堤体前面にマウンドを形成しているものが飛散、散乱した場合や前面地盤の洗掘などにより沈下した場合。またはそれらが複合して起こった場合である。

3.被災事例の統計的特性

(1)防波堤の種類による被災形態の差異

防波堤の種類によって、被災形態にどのような違いがあるのかを第1巻から第3巻に記載の被災例について調べた。ただし、施工中に被災した例は除く。第1巻に記載されている被災例は手戻り工事記録からの抽出例を除くと、直轄で災害復旧工事が行われたものばかりである。一概には言えないが、国が復旧工事をする被災はある程度大きなものであったと想定する。また、第2巻と第3巻の復旧工事記録からの記載条件は復旧予定金額が三千万円以上であるこ

とである。物価が違うので、1965年の三千万円と1982年の三千万円は同じ価値ではないが、その期間に比較的規模の大きな復旧工事であった防波堤、すなわち比較的大きな被害を受けた防波堤が収録されていると考えられる。

さまざまな種類の防波堤のなかで被災例の多いケーソン式混成堤、消波工被覆ケーソン式混成堤及びブロック式混成堤の被災形態を比較してみた。各混成堤でどんな種類の被災が多く起こっているか、その傾向を調べるため、各種の被災形態が起こった件数を集計し、全ての被災件数に対する各被災形態の占める割合を調べた。例えば同種の3防波堤甲乙丙があるときに、甲防波堤で上部工の破壊と被覆工の被災が起こり、乙防波堤で基礎工被災と被覆工被災、丙防波堤で被覆工の被災があった場合、上部工の被災1件、被覆工の被災3件、基礎工の被災1件と勘定する。そして全被災件数6件のうち50%が被覆工

の被災になると計算することにした。この作業をケーソン式、消波被覆ケーソン式、ブロック式の各混成堤について行った結果を図-1に示す。これによるとケーソン式とブロック式では、基礎工や被覆工などの捨石部の被災件数が全被災件数に占める割合はほとんど同じであり、直立部の変位件数と破壊件数のそれぞれの割合に違いが見られる。ケーソン式では直立部の変位が全被災件数の約19%を占めるのに対し、ブロック式ではその割合は約7%である。一方、直立部の破壊が全被災件数に占める割合はケーソン式の約6%に対しブロック式では約12%となっている。これはブロック式の場合、直立部が変位するような波力を受ける前にブロックが飛散したり、抜け出したりして直立部が破壊してしまい、変位被災の割合が小さくなるためだと考えられる。消波工被覆ケーソン式の場合、全被災件数の半数以上が消波工の被災である。また、直立部の破壊は消波工で被覆さ

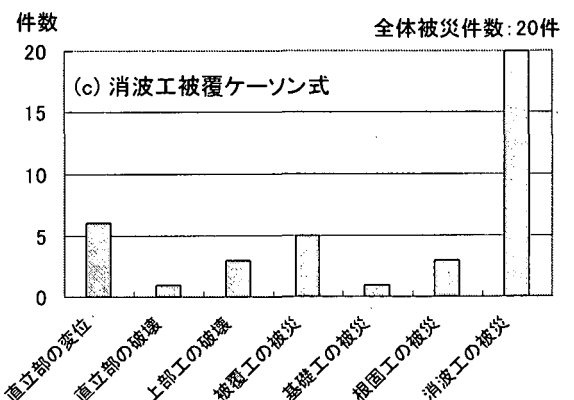
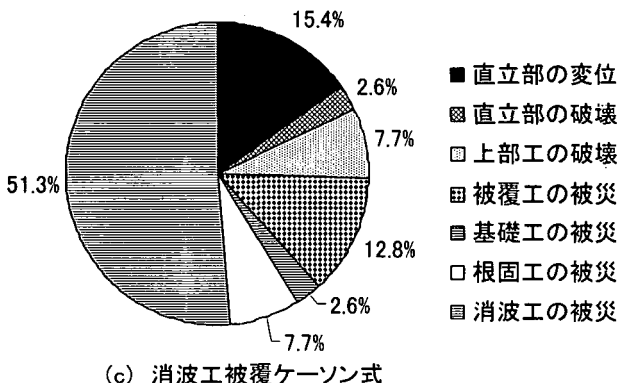
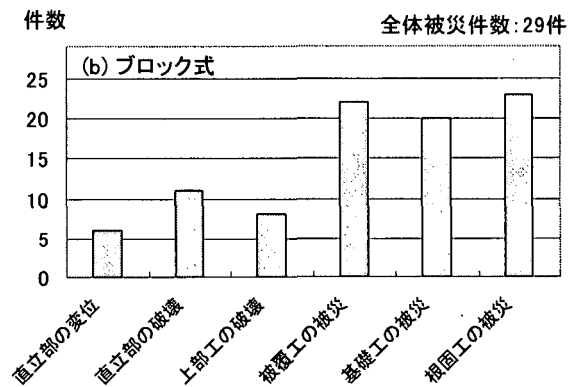
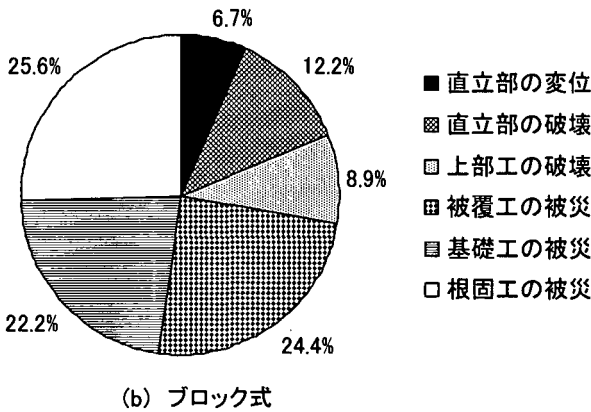
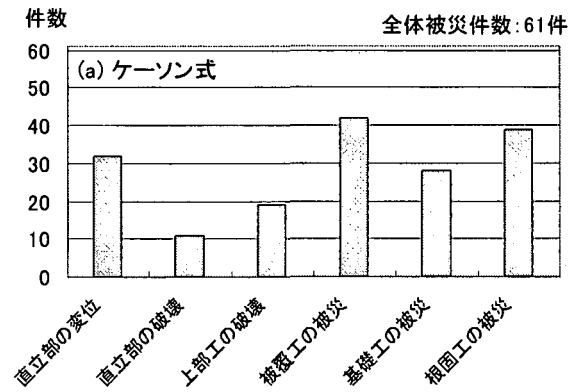
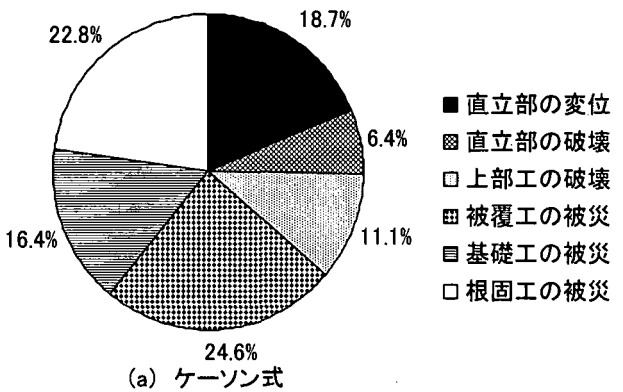


図-1 構造形式別の被災形態割合

図-2 構造形式別の被災発生割合

れていることもあって非常に小さな被災の割合となっている。

図-1では各種の被災形態間でどの種の被災の割合が多く、どの種の被災の割合が少ないかの傾向がわかるけれども、防波堤の被災形態それぞれがどの程度の割合で発生しているかわからない。そこで、各種の被災が同一構造の防波堤のなかでどれだけ起こったかを調べた。この結果を図-2に示す。例えば、a)のケーソン式の混成堤の場合、全被災堤数61のうち32個(52%)の防波堤で直立部の変位が起こり、11個(18%)の防波堤で直立部の破壊が起こっている。これを見ると、ケーソン式とブロック式はここでも上部工の破壊と捨石部の被災においては差がなく、直立部の変位と直立部の破壊においてのみ違

いがある。これは上で述べたのと全く同じ理由である。消波工被覆ケーソン式は被災した全てで、消波工被災が起こっており、消波工が被災を受けずに他の部分が被災することは無いと言える。また、直立部の変位、直立部の破壊、捨石部の被災の全てで、ケーソン式より被災し難い傾向があり、防災に役立っていることが推測できる。

(2) 被災原因による被災形態の差異

被災原因となった異常気象によって、被災形態にどのような違いがあるのか見てみる。

第1巻から第3巻に収録されているケーソン式のそれぞれに関して、被災例のなかで台風、冬期風、低気圧が原因であったものを調べた。ただし施工中に

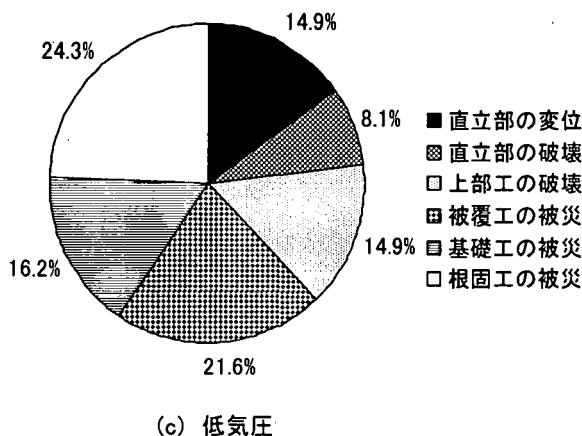
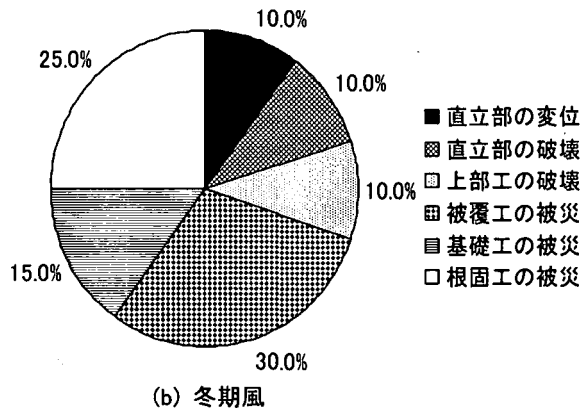
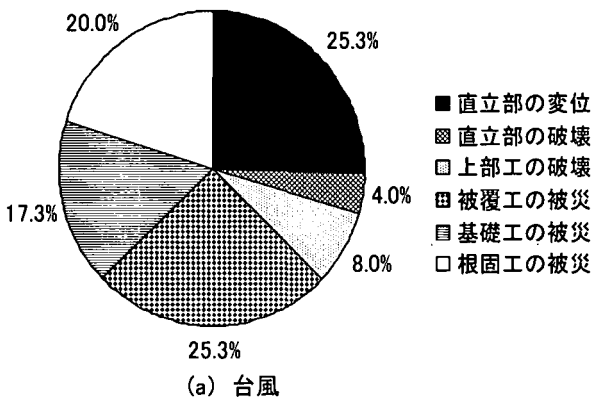


図-3 原因別の被災形態割合

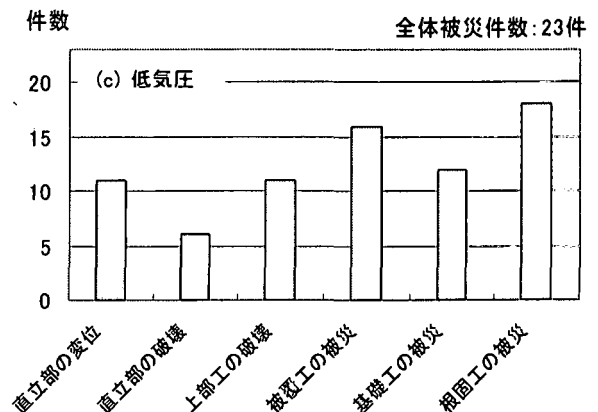
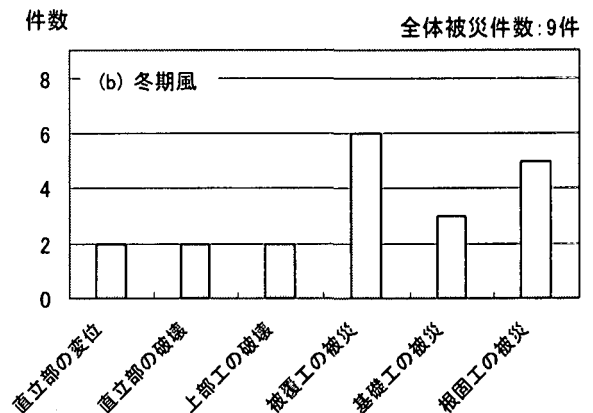
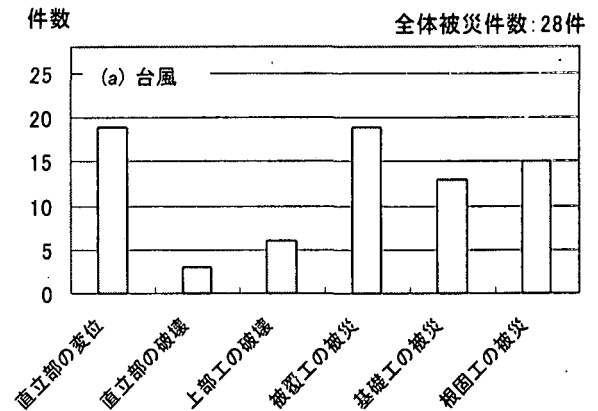


図-4 原因別の被災発生割合

被災したものは除く。まず原因別に各種被災形態間の割合がどのような傾向を持つのか前項の図-1, 2と同じ方法で調べた。

ケーソン式混成堤について調べた結果を図-3, 4に示している。図-3によると、台風と低気圧では捨石部（被覆工, 基礎工および根固工）の被災割合はほぼ同じになっているが、冬期風ではそれが若干多い。直立部の変位は台風で最も多く、低気圧がそれにつき、冬期風で最も少ない。直立部と上部工のそれぞれの破壊は台風で最も少ない。上部工の破壊は、低気圧で最も多い。

図-4をみると、台風が原因で被災した防波堤のうち19個(68%)の防波堤で直立部の変位が起きており、冬期風浪が原因の場合の9個中2個(22%)被災と大きな差がある。直立部の変位は台風で最も発生しやすく、冬期風で最も起こりにくいと言える。低気圧はその中間である。これは冬期風浪の波力は毎年安定しており、直立部を変位させるような、設計波力から大幅にずれた波力が発生しないためと思われる。逆に、台風は規模も経路も色々で発生する波力に大きなばらつきがある。

4. 直立部変位の変位形態別発生特性

直立部の変位被災を、その変位形態別にさらに4つに分類する。直立部が鉛直方向にほとんど変位せず、主として水平方向に移動した場合、この変位形態を滑動と名づけ、水平方向にほとんど変位せず傾斜沈下したとき、支持力破壊とした。滑動と支持力破壊が同時に起こってどちらとも言えない場合、複合破壊（滑動+支持力破壊）とした。直立部の側壁が完全にマウンドまたは海底地盤に付いた場合、これを転倒とした。各変位形態の典型的な例を図-5に示す。

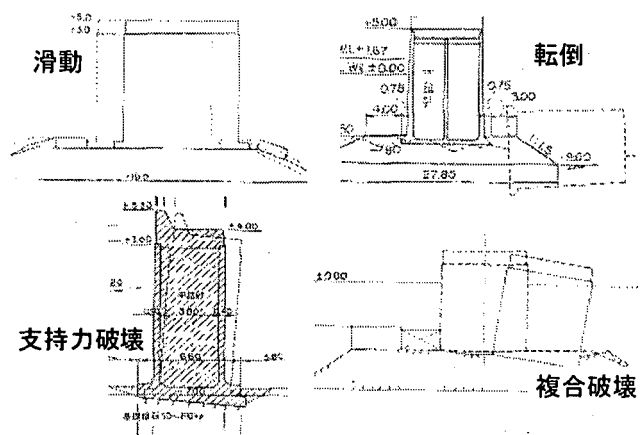


図-5 直立部の変位形態

(1) 変位形態別発生割合

直立部が変位した被災例のなかで、どのような割合で上述の各変位形態をとるのかをケーソン式混成堤について調べた。結果を図-6に示す。これによると、直立部が滑動した例が70%近くを占めており、

これが最も起こりやすい変位形態であることがわかる。しかし逆にいうと、変位した防波堤の30%強が水平に移動するだけでなく、傾斜していたといえる。消波工被覆堤についてもほぼ同様の傾向があった。

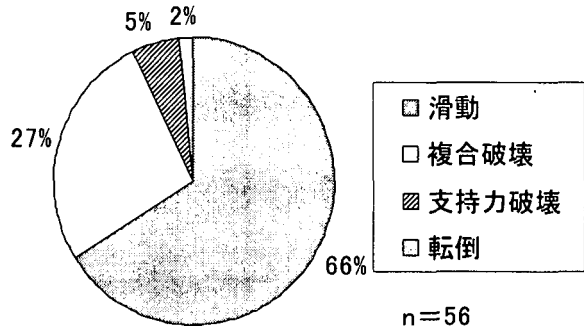


図-6 ケーソン式混成堤における変位形態割合

(2) 変位形態とアスペクト比

防波堤の直立部は多くの場合、ほぼ鉛直に近い壁面を持ち直方体と見なせるので、堤体のアスペクト比に着目した。ただし、直立部の底面からその上部工パラペット部の天端までを堤体の高さとした。底面に張り出しがあるものはそれを含めて底面幅とした。

前項の結果、消波工の有無によって直立部の変位形態に差は無いものと考え、消波工の有るものと無いものをまとめて考える。

図-7は、直立部が変位したケーソン式混成堤と消波工被覆堤について、堤体幅とその高さの関係を、変位形態別にプロットしたものである。上部工が未施工のものを含む。図中の直線はアスペクト比（高さ/底面幅）が1.0の直線であり、複合破壊（滑動+支持力破壊）はこの直線の上側に多い。また、転倒はこの線の下側には無い。表-1は、堤体のアスペクト比を調べ、平均と標準偏差を求めたものである。被災例の多い、滑動と複合破壊（滑動+支持力破壊）について度数分布を図-8に示す。この図はアスペクト比0.2ごとの度数分布を0.0から2.0までを調べ割合で示したものである。以上の結果は堤体に傾斜がみられたものほどアスペクト比が大きい傾向があるとい

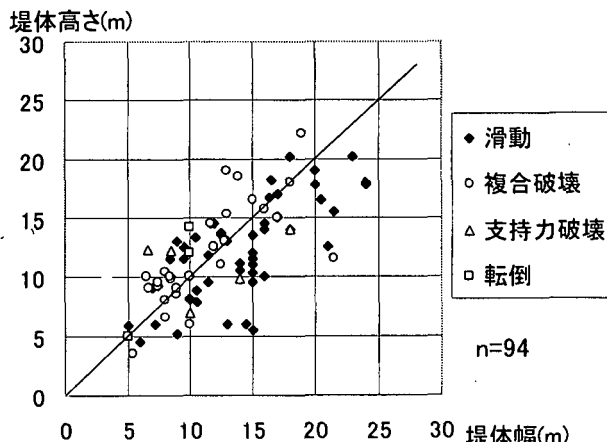


図-7 変位した防波堤の高さと幅の関係

表-1 各変位形態のアスペクト比

被災形態	被災数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
滑動	56	0.922	0.246	1.44	0.367
複合破壊	29	1.04	0.303	1.54	0.535
支持力破壊	6	1.03	0.456	1.86	0.7
転倒	3	1.21	0.172	1.42	1

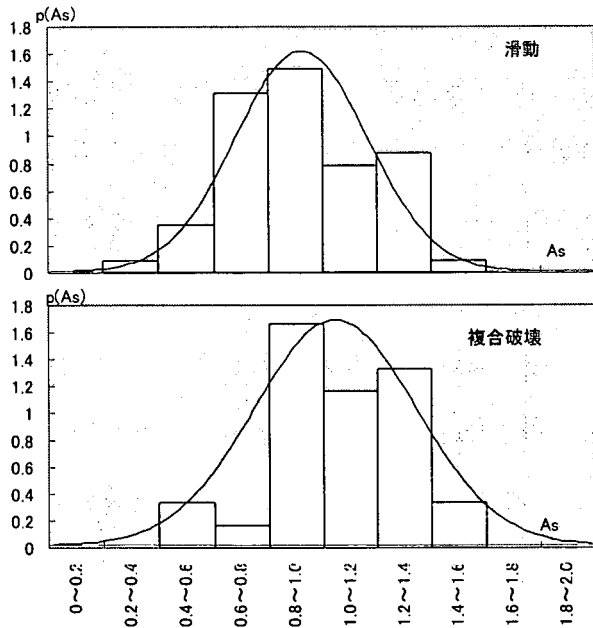


図-8 アスペクト比の相対度数分布

うことを示している。

(3) 変位形態と堤体に作用する波力

堤体に働く水平波力と抵抗力を求め、それらと変位形態に相関があるかを調べた。波力は被災防波堤集覧に記載されている被災時の波浪条件から合田公式⁶⁾を用いて算定した。消波工被覆堤の場合、波高が水深の0.5倍以上だったので、波圧の低減率 λ には0.8を用いた⁶⁾。

求まった波圧より水平波力 P と揚圧力による鉛直波力 U を求め、被災防波堤集覧記載の断面図より堤体の水中重量 W_0 を求めた。堤体と捨石マウンドとの摩擦係数を μ とすると、抵抗力 R は $R=\mu(W_0-U)$ によって求められる。

以上のように求めた水平波力、抵抗力を μW_0 で除して無次元化し、それぞれを横軸と縦軸にとったものを図-9に示す。これをみると無次元化した抵抗力は0.7から0.9の狭い範囲に収まっている。この帯のなかで滑動のほうがやや左に、複合破壊や支持力破壊、転倒がやや右に位置している。無次元化した水平波力が0.6以下では支持力破壊や複合破壊は起こっていない。つまり抵抗力に比して水平波力が大きい場合ほどに堤体が傾斜しやすい傾向がある。これは水平波力が大きいほど、それによる堤体後趾まわりのモーメントが大きくなり端趾圧が大きくなるため、

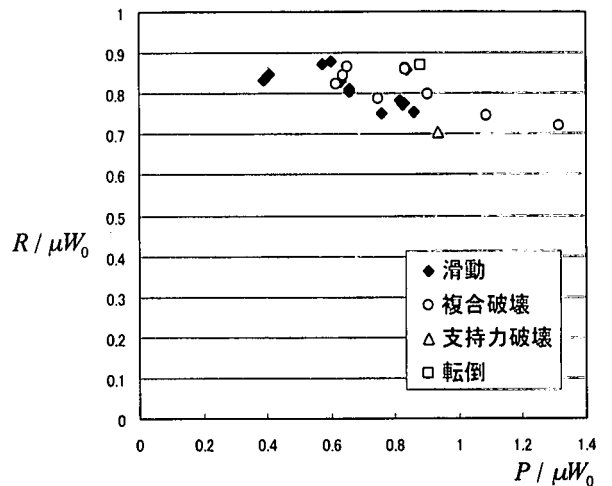


図-9 変位した防波堤における水平波力と抵抗力の関係

地盤の支持力が破壊しやすく、その結果、堤体が傾斜するためだと思われる。

5. あとがき

本研究によって得られた結論は以下のようである。

- 1) 消波工被覆堤では、堤体本体が変位する割合は混成堤の場合に比して小さい。これは、消波工が実際に波圧を低減していることを示している。
- 2) 冬期風浪で堤体本体が変位する割合は、台風や低気圧に比して小さい。これは冬期風が、台風などに比して例年安定しており、設計波力を大きく上回るような波力を受け難いためである。
- 3) 滑動以外の堤体の変位を傾斜とすると、本体が傾斜した防波堤の方が水平方向にのみ変位したものよりもアスペクト比は大きい傾向があった。
- 4) 水平波力が抵抗力に比して大きいほど、堤体は傾斜しやすいことがわかった。

参考文献

- 1) 高橋重雄・木村克俊・下迫健一郎・鈴木高二朗・五明美智男：ケーソン式混成堤の主要な被災パターンについて、海岸工学論文集、第46巻、pp.816-820,1999.
- 2) 運輸省港湾技術研究所：被災防波堤集覧、港湾技研資料、No.58, 1968.
- 3) 運輸省港湾技術研究所：被災防波堤集覧(その2)、港湾技研資料、No.200, 1975.
- 4) 運輸省港湾技術研究所：被災防波堤集覧(その3)、港湾技研資料、No.485, 1984.
- 5) 運輸省港湾技術研究所：被災防波堤集覧(その4)、港湾技研資料、No.765, 1993.
- 6) 合田良実：増補改訂 港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説、pp.32-117,1991.