

構造物隅角部における消波ブロックの被災メカニズム

目見田 哲*・三谷敏博**

護岸隅角部において、ハドソン式を基にした評価からは十分に安定と考えられるにもかかわらず、消波ブロックの移動が発生している。本稿は、平面実験によって被災特性を把握し、被災メカニズムを考察するとともに、入射波の多方向性、継続時間の影響について評価する。その結果、隅角部背後かつケーソン沿いの消波ブロックが最も不安定となる。ケーソン天端における斜め入射波の碎波に加えて、斜め入射波がケーソン前面に作用した際に発生する激しい水粒子運動や循環流が主要因と考えられる。さらに、最も不安定な領域の消波ブロックが移動すると、その付近の消波機能が低下するために、消波ブロック移動の領域が時間とともに広がっていく。入射波の多方向性の影響も大きくあらわれており、単一方向不規則波に対して最も不安定となる。

1. はじめに

海域構造物の耐波設計は変わりつつあり、性能設計 (Performance Design) による評価が目指されている。性能設計とは構造施設の性能および照査方法を体系化して規定する設計法といわれている。これらを実現していくためには、構造物の安全側の評価に加えて、被災パターンや被災特性を正確に把握し、構造物の被災メカニズムを解明していくことがさらに重要になる。

消波ブロック被覆堤についても、現地計測や水理模型実験に基づき、被災パターンが考察されている。リーフや急勾配な海底における激しい碎波現象、堤頭部や端部における水粒子運動、施工時などの不完全消波における衝撃波力、洗掘や吸出しによる沈下などが注意すべき被災要因として指摘されている (高橋ら, 1999)。しかし、被災パターンを十分に抽出しきれているかを判断することは困難であり、構造物周辺波浪場がどのようなようになるために、どの部分からダメージが進行していくのかという被災メカニズムを多くの例について解明することが必要である。これは、部分的なダメージを受けた既設構造物を目の当たりにした時に、大きなダメージにつながる前兆なのか、それとも部分的、一時的なものにすぎないのかを判断し、その後の補修計画を立てていく時に極めて重要なことといえる。

護岸隅角部の消波ブロック (テトラポッド) において、ハドソン式 (Hudson, 1959) による設計法を十分に満足する条件であっても、移動が発生している。小規模なブロック移動に対しても早急に原形状に復旧するという応急処置を繰り返しているために、補修コストがトータルで大きな額に達している。適切な補修計画のためには、現地での発生現象がさらに大規模なブロック移動につな

がるか否かを把握することが要求され、そこでは被災パターンを再現する平面実験結果を反映するべきといえる。

捨石堤堤頭部の被覆層に多方向不規則波が作用する場合、単一方向不規則波と比較して安定性が低下する場合があることが指摘されている (松見ら, 1996)。護岸隅角部の消波ブロック安定性についても平面実験による検討がいくつか実施されている (榊山ら, 1994; 富田ら, 2000)。しかし、最もシビアな入射角や入射波の多方向性が消波ブロック安定性に与える影響について未解明な部分が多い。被災パターンごとに、入射角や多方向性の影響を十分に把握することが必要である。また、木村ら (1997) は、防波堤堤頭部を対象とした現地観測や水理実験を実施し、斜め入射波が作用する堤頭部付近の消波ブロックが不安定になることを指摘している。

本研究においては、護岸隅角部の消波ブロック安定性について考察する。単一方向不規則波、多方向不規則波を用いた平面実験によって、被災特性や波浪場特性を把握し、被災メカニズムを解明する。さらに、入射波の多方向性、継続時間の影響について評価する。

2. 現地特性

(1) 構造物

護岸標準断面を図-1に示す。ケーソン前面と上部に消波ブロックが設置されており、ケーソン天端が低い。護岸前面消波ブロックは全断面被覆形式であり、ケーソン上部については水平二層積である。現地において移動が発生しているのは、ケーソン前面の消波ブロックである。隅角部の設置水深は約15mである。

(2) ハドソン式による消波ブロック所要質量

消波ブロックの移動が発生した際の波浪観測データ (水深約28m) を基に、ハドソン式によって、隅角部の消波ブロック安定性を検討する。沖波条件として、 $H_{1/3} = 5.9\text{ m}$, $T_{1/3} = 9.6\text{ s}$, N方向が得られている。潮位はH.W.L (+0.4 m) である。多方向性に関する現地観測

* 正会員 博(工) 関西電力㈱ 電力技術研究所
** 関西電力㈱ 電力技術研究所

データはないが、 $S_{max}=25$ とする。エネルギー平衡方程式、碎波帯内の波高算定図（合田，1975）を用いて隅角部の入射波高を算定すると、隅角部には $H_{1/3}=4.0$ mの波が作用する。波の作用方向はN方向から時計回りに定義すると、約40°に相当する。ハドソン式によって消波ブロック所要質量を算定し、1.5倍しても11t程度にしかない。現地でも20tの消波ブロックが移動したことについては、隅角部周辺の消波ブロックが構造的に弱いということのみで説明できない。隅角部付近の波浪場特性が大きく影響していると考えられる。水理模型実験によって、斜め入射波、波数、不規則性（多方向性）の影響を把握することが必要といえる。

3. 多方向不規則波造波装置による平面実験

(1) 実験装置と模型

多方向不規則造波装置（60枚の造波板；幅30 cm/枚）を備えた造波水槽において水理模型実験を実施した。地形と構造物の模型平面図について図-2に示す。護岸隅角部を有効造波領域内に配置すること、消波ブロック挙動分析のために模型縮尺を大きくすることより、模型縮尺1/65とする。沖波条件がN方向の時の地形開始部における波向が造波装置と直角になるように実験模型を

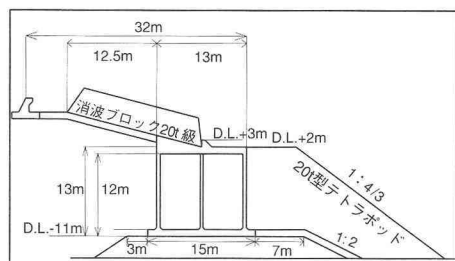


図-1 北護岸標準断面図

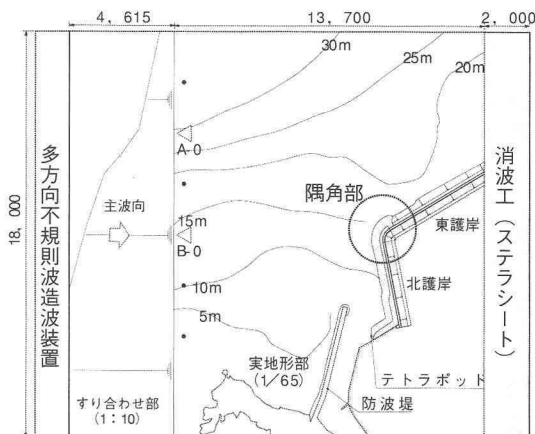


図-2 地形と構造物の模型平面図

配置する。実験水槽における隅角部付近の構造形状について写真-1 に示す。

(2) 波浪条件

現地観測データを用いて、波浪推算から導かれた波浪条件を表-1に示す。過去に消波ブロック移動が発生した際のケース1が10年確率波にほぼ相当し、ケース2は100年確率波に相当する。沖波条件として現地観測データを用いて、エネルギー平衡方程式によって地形開始部の波浪条件（波高，周期，波向）すなわち造波条件を算定した。周波数スペクトルは Bretschneider-光易型，方向関数は光易型とする。最も波高の大きい波が入射するN方向に加えて，比較的大きい波が入射するNNE，NNW方向についても検討する。約300 sを1サイクルとして，ダブルサンメンション法によって造波信号を作成した。

(3) 波の継続時間

隅角部付近においては，斜め入射波，反射波，回折散

表-1 波浪条件

ケース	1M	1U	1'U	2M	2U
波高 (m)	5.9	5.7	5.9	6.8	
周期 (s)	9.6	10.9	9.6	12.0	
波向	N	NNE	NNW	N	
Smax	25	—		25	—

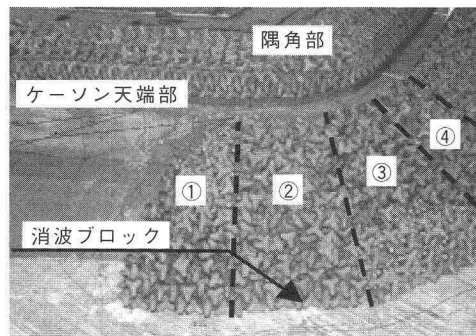
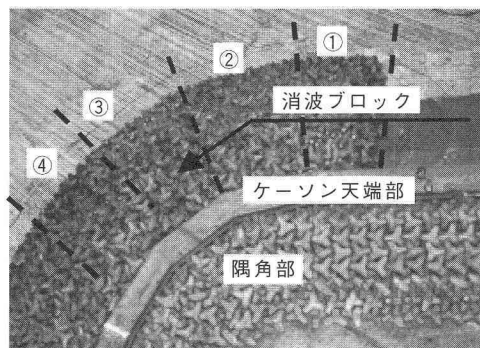


写真-1 隅角部付近消波ブロック (20t)

乱波が共存するために波浪場が複雑であり、ブロックの被災パターンも複雑と考えられる。さらに、ある領域の消波ブロック移動が波浪場特性に影響する可能性も考えられるために、構造形状変化の過程を把握することが必要である。防波堤堤頭部における消波ブロック安定性については、単一方向不規則波を用いて、作用波数4,000波までの被災過程を把握するための平面実験が実施されており、3,000波付近においても被害率が増加していく例が示されている(木村ら, 1997)。今回の平面実験をすすめるにあたって、基本的に、現地の約50時間以上に対応する波を作用させている。これは現地波浪観測データに基づいて設定した値であるが、冬季の日本海側であるためにかなり長い値となる。

(4) 消波ブロックの耐波安定性評価法

消波ブロック質量決定についても、性能設計的な考え方を導入し、安全性能向上と建設コストの低減化を図る必要が指摘されている(平石ら, 2003)。そこでは、沖合防波堤前面の消波ブロック安定性が検討されている。各部分ごとに防波堤断面、供用期間、背後水域の重要性などを考慮した目標ブロック被害率が設定されており、それを満足する最適な消波ブロック形状と質量が決定されている。消波ブロック性能について『許容値まで被害を受けても防波堤の滑動を防止できるように作用波力を低減できるもの』と規定している。目標被害率としては、ブロック移動が堤体本体の安定性に直接影響を与えてしまう堤体前面について3%、直接影響しないがマウンド洗掘につながる可能性を含む堤頭部先端と背後側について5%が用いられている。

本研究においては、被害率の時系列変化を把握する。被害率が5%以内であること、かつ平衡形状に達していることをもって、隅角部の消波ブロックが安定であると考える。

4. 被災メカニズム分析

構造物前面の消波ブロックが波浪による被災を受けた時、時間が経過した時点での状況しか把握できないことが多い。よって、被災が進行していく過程において、構造物前面に波がどのように作用していたかという波浪場特性や最初にどの部分から消波ブロックの移動が始まったかなどの被災特性を把握することが難しい。さらに、消波ブロック全体が平衡形状に達しているか否かの変形特性についても把握できない。

被災メカニズムを分析するために、平面実験を実施する。埋立地護岸隅角部付近の消波ブロックについて、被害率の時系列変化を把握し、被災パターン、被災メカニズムを検討する。

過去、最も激しく消波ブロックの移動が発生した時の

波浪条件(ケース1U:N方向)における被害率の時系列変化を図-4に示す。単一方向不規則波を用いる。隅角部周辺波浪場を分析すると、ケーソン天端における斜め入射波の激しい碎波にともなう、消波ブロック天端およびケーソン沿いに速い流れが発生する。さらに、隅角部の消波ブロック端部付近においては、斜め入射波がケーソン前面に激しく作用すること、その際に局所的な激しい水粒子運動や循環流が発生することが大きな特徴である(図-3参照)。また、天端高が低く、ケーソン上部にも消波ブロックがあるために、ケーソン上面からの戻り流れが顕著である。

図-3に示すように、隅角部付近の消波ブロックをケーソン外枠形状に基づいて4分割し、各領域ごとに被害率を算定する。平面実験においては、250~300波程度の波群を繰り返し造波する。1サイクル後(現地時間約40分に相当)の被害率に注目すると、領域①について約15%に達するが、領域②について3%以下であり、領域④においてはブロック移動が見られない。隅角部背後端部付近の領域①においては一気にダメージが進行する。この領域は、斜め入射波がケーソン前面に作用する際に、激しい水粒子運動や循環流が発生することが特徴である。領域①の中でも、ブロック移動が最初に進行する部分は、ケーソン沿いの静水面付近であり、局所的な激しい水粒子運動、循環流が大きく影響していると考えられる。

造波を続けていくと被災領域が広がっていき、7時間付近になると、領域④においても、消波ブロックが移動する。消波ブロック移動によって前面勾配が小さくなって隅角部全体が安定化していく傾向は見られない。継続時間が約50時間においても、領域③、④を中心に、被害率が増加していく傾向を示す。最も不安定な隅角部背後端部付近かつケーソン沿いの消波ブロックが移動すると、その付近のケーソン前面に斜め入射波がダイレクトに作用するようになり、水粒子運動がさらに激しくなることが確認できる。結果的に、継続時間が長くなると、消波ブ

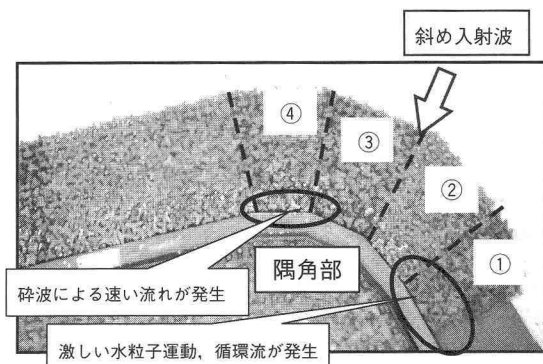


図-3 隅角部周辺の波浪場 (N方向)

ロックが不安定となる領域が次第に②, ③, ④方向に広がっていくと説明できる。

100年確率波（ケース2U：N方向）について被害率の時系列変化を図-5に示す。領域①の消波ブロック端部付近の挙動については、ケース1Uと同様の挙動を示す。しかし、大きく異なるポイントとして、領域④付近において、領域②, ③からのダメージが進行する以前に消波ブロック移動が発生することが挙げられる。継続時間が短いと、領域④の被害率は領域③と比較しても大きな値を示す。領域③でブロックが移動する以前の領域④におけるブロック移動は、ケーソン天端における斜め入射波の激しい碎波にともなう消波ブロック天端、ケーソン沿いに発生する速い流れの影響と考えられる。ケース2Uに対して、ハドソン式によるブロック所要質量を1.5倍すると20tに近い値となる。

隅角部背後端部かつケーソン沿いの消波ブロックが不安定となる現象については、防波堤前面に端部を有する消波ブロック端部が不安定となる現象（塩見ら, 1994）と類似している。ここでは、防波堤前面の消波ブロック端部付近のブロックが移動し、波力が増大することによって発生するケーソン滑動を中心に議論されており、消波ブロック必要質量およびブロック端部付近の波浪場特性については特に述べられていない。

消波ブロック補修工事については、ブロック移動が発生してから早急に補修することが建設コスト的に効率がよいという考え方もある。しかし、隅角部背後端部かつケーソン沿いの消波ブロックの被災パターンのように、平衡形状が見いだせないほど広い範囲にわたって消波ブロック移動が進行していく場合については、その考え方は適さない。

平面実験において、図-2に示した防波堤先端部の波浪場についても観察することができた。この場合、先端部全体を消波ブロックで被覆しており、消波ブロック端部が防波堤背後に位置する。その領域には、斜め入射波がダイレクトに作用しない。よって、隅角部の消波ブロック端部と被災パターンが大きく異なると考えられる。

5. 多方向性の影響

多方向性の影響を定性的に評価するために、多方向不規則波（ $S_{max}=25$ ）に対する消波ブロック安定性を検討する。100年確率波（ケース2M）に対する被害率の時系列変化を図-6に示す。単一方向不規則波と比較して、消波ブロックの被害率は小さい値を示す。斜め入射波がケーソン前面に作用した際に激しい水粒子運動や循環流が発生すること、ケーソン天端における激しい碎波にともない消波ブロック天端に速い流れが発生することが被災メカニズムに大きく関連していることから、入射波

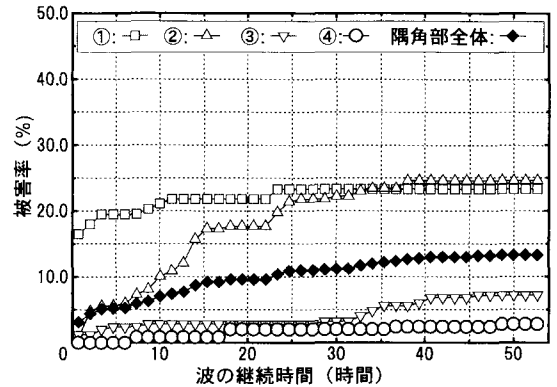


図-4 被害率の時系列変化（ケース1U：N方向）

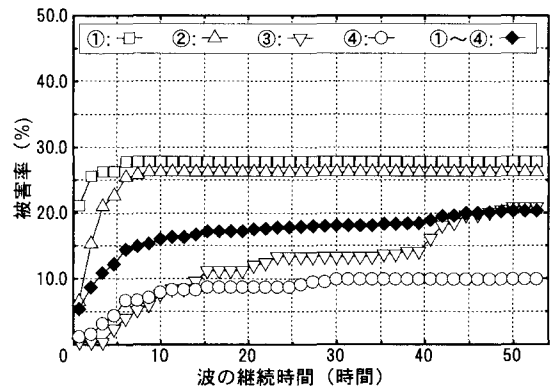


図-5 被害率の時系列変化（ケース2U：N方向）

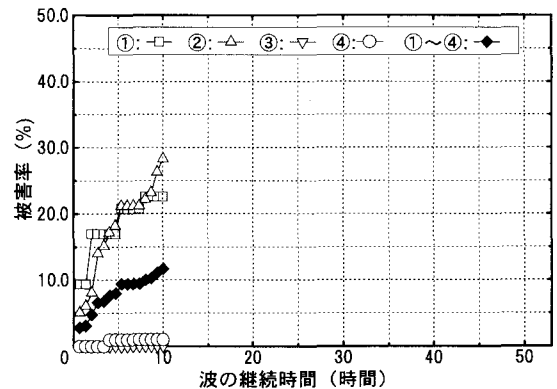


図-6 被害率の時系列変化（ケース2M：N方向）

の波峰が短い、多方向不規則波に対して、消波ブロック安定性が向上すると考えられる。

よって、ここで対象とした波浪条件については、単一方向不規則波に対して消波ブロック安定性がシビアとなり、入射波の多方向性、 S_{max} を決定するための現地観測データがなくても、単一方向不規則波を用いた平面実

験によって安全側の評価ができるものと考えられる。

6. 最適構造形状

隅角部付近の消波ブロック質量を40 t, 50 tとした場合について、ケース1U, 2U (N 方向) における隅角部全体 (領域①～④: 図-3 参照) の被害率の時系列変化を図-7 に示す。消波ブロックを50 t とすると、ケース1U を50時間以上作用させた後においても被害率が3%以下であり、消波ブロックの移動がほとんど発生しない。なお、入射角を変化させたケース1'U (NNE 方向), ケース1''U (NNW 方向) についても安定性を確認できた。

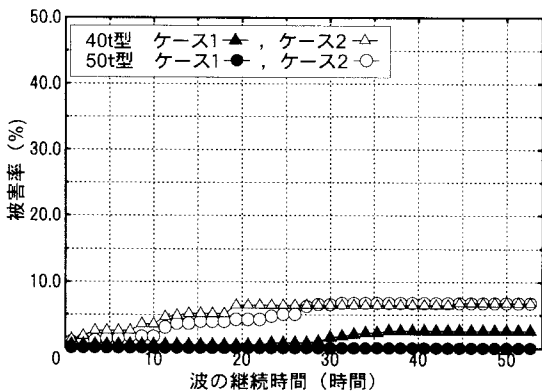


図-7 被害率の時系列変化
(40 t, 50 t ブロック: ケース1U, 2U)

7. 結 論

護岸隅角部における消波ブロック被災特性や波浪場特性を把握し、被災メカニズムを解明するとともに、入射波の多方向性、継続時間の影響についても評価した。その結果、ハドソン式を基にした評価からは十分に安定と考えられるにもかかわらず、消波ブロックが移動する被災パターンが見られる。その際、隅角部背後かつケーソン沿いの消波ブロックが最も不安定である。ケーソン天端における斜め入射波の碎波に加えて、斜め入射波がケーソン前面に作用した際に発生する激しい水粒子運動や循環流が主要因と考えられる。最も不安定な隅角部背後かつケーソン沿いの消波ブロックの移動によって、その

付近の消波機能が低下するために、消波ブロック移動の領域が次第に広がっていく。この被災パターンにおいては、入射波の継続時間の影響が大きく、長時間にわたって消波ブロックの移動が進行する。さらに、入射波の多方向性の影響が大きくあらわれる。斜め入射波がケーソン前面に作用した際に局所的な激しい水粒子運動や循環流が発生することが主要因であることから、入射波の波峰が短い、多方向不規則波に対しては、消波ブロック安定性が向上すると考えられる。

構造物隅角部の消波ブロックの耐波特性において、建設コスト低減を追求していく場合、現地の入射波の多方向性を定量的にどう評価するか、高波浪の次に来襲する低波浪も含めて波浪の継続時間をどう評価するかが課題といえる。

最後に、計測にあたっては、(株)日本工業試験所 内西博氏、渡辺博氏の協力を得たことを記して、謝意を表します。

参 考 文 献

- 木村克俊・上久保勝美・坂本洋一・水野雄三・竹田英章・林倫史 (1997): 消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロックの耐波安定性, 海工論文集, 第44巻, pp. 956-960.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 14巻, 3号, pp. 59-106.
- 榊山勉・鹿島遼・窪泰浩 (1994): 多方向不規則波に対する人工島防波護岸の越波特性と耐波特性, 海工論文集, 第41巻, pp. 656-660.
- 塩見雅樹・山本浩・津川昭博・黒沢忠男・永松宏一 (1994): 消波ブロック不連続部の波力増大による防波堤の被災とその対策に関する研究, 海工論文集, 第41巻, pp. 791-795.
- 高橋重雄・木村克俊・下迫健一郎・鈴木高二朗・五明美智男 (1999): ケーソン式混成堤の主要な被災パターンについて, 海工論文集, 第46巻, pp. 816-820.
- 富田孝史・河合尚男・海原敏明・平石哲也 (2000): 隅角部を有する消波ブロック被覆式護岸の多方向不規則波による越波特性とブロックの安定性, 海工論文集, 第47巻, pp. 886-890.
- 平石哲也・服部昌樹・稲垣茂樹・鈴木智浩 (2003): 安定係数による沖合防波堤消波ブロック被覆層の性能調査, 海工論文集, 第50巻, pp. 756-760.
- 松見吉晴・大野賢・家村健吾・木村晃 (1996): 多方向不規則波浪場における堤頭部の被災特性, 海工論文集, 第43巻, pp. 811-815.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, Proc. ASCE, Vol.85, WW3, pp. 93-121.