消波ブロック被覆堤の最下層に設置される ブロックに作用する上載荷重に関する 実験的研究

昇 悟志¹・久保田 真一²・松本 朗³・千々和 伸浩⁴・岩波 光保⁵

¹正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 材料・構造研究室
(〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7)
E-mail: satoshi.noboru@fudotetra.co.jp

²正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 水理研究室 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7)
E-mail: shinichi.kubota@fudotetra.co.jp

³正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7)
E-mail: akira.matsumoto@fudotetra.co.jp

⁴正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: chijiwa@cv.titech.ac.jp

⁵正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)
E-mail: iwanami@cv.titech.ac.jp

消波ブロックの構造性能の評価手法を確立するために、消波ブロック被覆堤を対象に消波ブロックに作用する荷重の中でも最下層に設置するブロックに作用する上載荷重に着目し、荷重の分布特性や波浪による変動荷重の特性を明らかにするとともに、荷重の定式化の可能性を探ることを目的に、上載荷重の測定実験を静穏下ならびに波作用下で実施した。その結果、静穏下における最下層ブロックに作用する上載荷重はガンマ分布で近似でき、波作用下における変動荷重は越波時と非越波時で傾向が変化する特性を有していることが明らかとなった。また、静穏下の上載荷重ならびに波作用下の変動荷重を定式化した。

Key Words: wave-dissipating concrete block, surcharge load, breakwater covered with wave-dissipating concrete blocks

1. はじめに

日本国内の港湾・漁港施設や海岸施設等には数多くの消波ブロックが用いられている。目的は施設に作用する波力や反射波、および施設を乗り越える越波量の低減等であり、代表的な施設として、図-1 に示した消波ブロック被覆堤がある。

現在、このような施設に用いられる消波ブロックの規格(ブロックの種類、大きさ)は、質量算定の基本式(ハドソン式)や水理模型実験等による耐波安定性および消波機能(反射率、伝達率等)の評価、および経済性等によって決定される。

一方、ケーソン前面の消波工に置かれた消波ブロックには、その上層に積まれる消波ブロック群による荷重(以降、上載荷重と呼ぶ)が作用する(図-2)。この荷

重は静穏時の死荷重と、波浪による変動荷重の組合せになると考えられる。

また、波浪の繰返しによって表層の消波ブロックが不安定な状態となり、小さな回転運動や移動、および転落等を起こして隣接する消波ブロック等に衝突することによる衝撃荷重も作用する(図-3)。この荷重は衝突時の速度に依存すると考えられる。

現在、国内で使用されている消波ブロックの大半は無筋コンクリートである。ゆえに、上載荷重や衝撃荷重によって一度ひび割れが発生すればブロックの損傷が一挙に進行し、場合によっては連鎖的に周囲のブロックの損傷を誘発する可能性がある。その損傷は、消波工の沈下や散乱、またはケーソンの損傷を引き起こし、結果的に港内の静穏度が低下し、港湾の機能が損なわれる可能性がある。よって、消波ブロックがこのような作用に対し

図-1 消波ブロック被覆堤 (例)

図-2 上載荷重

図-3 消波ブロックの動揺と衝突

図-4 消波ブロックの不規則的な配置

て十分な構造強度を有することは重要であるが、現状は消波ブロックの規格決定に構造強度の評価はほとんど反映されていない。上述した質量算定の基本式や水理模型実験等による評価については、ブロックの種類に関わらず同一尺度で評価できる手法が確立されているものの、構造強度に関しては未だに評価手法が確立されておらず、経験的な評価（判断）に留まっている。これが確立されれば、耐波安定性と構造強度の両面から消波ブロックの種類や大きさを合理的に決定することができ、結果的に港湾の機能をこれまでよりも長期に亘り確実に維持できるものと考えられる。

消波ブロックの構造強度の評価手法を確立するためには、消波ブロックの耐荷力の評価と作用の設計値が必要となる。特に作用は設計値を設定する以前に、上載荷重の特性や、波浪による繰返し衝突時の衝撃荷重および衝突速度の特性を明らかにしなければならない。上載荷重に関しては、著者ら¹⁾がある特定のブロックを対象として測定実験を実施している。しかし、この実験は完全に気中状態でのものであり、水位の影響や波浪による変動荷重の影響は検討されていない。また、消波ブロックの繰返し衝突については、有川ら²⁾がケーソン壁へ繰返し衝突する消波ブロックの衝撃荷重や衝突速度に関する研究を行っているが、規則波を対象とした実験であり、その波高や周期が限定されている。また、山口ら³⁾も消波ブロックの衝突に関する研究を行っているが、繰返し衝突を対象としたものではない。よって、いずれの研究も、消波ブロックの作用の特性を明らかにするには至っていない。

そこで本研究では、消波ブロック被覆堤を対象に、上

述した作用の中でも消波工の最下層に設置される消波ブロックに作用する上載荷重に着目し、その荷重の分布特性や波浪による変動荷重の特性を明らかにするとともに、上載荷重の定式化の可能性を探ることを目的に、消波ブロック模型を用いた上載荷重の測定実験を実施した。

なお、波浪による繰返し衝突時の衝撃荷重と衝突速度の特性や、消波ブロックの耐荷力評価については、別途著者らによる検討を現在行っている。

2. 静穏下の最下層ブロック単体に作用する上載荷重

消波工に用いられるブロックは、図-4のように最下層については規則的に配置され、その上方は不規則的に配置されるのが一般的である。よって、その不規則性により最下層のブロック群に均等な上載荷重が作用するとは考え難く、あるばらつきを持つ分布となり、その分布はブロックの形状や大きさおよび測定対象の最下層ブロックの設置位置により異なるものと推測される。しかしながら、その荷重分布の平均値は図-5の荷重モデルを用いて式(1)のような形式で表すことができるものと考えられる。

$$P_c = \rho_B g S h - W' \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \rho_B = (1 - p/100) \{ \rho_c - \rho_w (h_s/h) \}$$

ここで、 ρ_B は消波工の見かけの密度、 g は重力加速度、 S はブロック1個の支配面積、 h は消波工の高さ、 p は空隙率、 ρ_c および ρ_w はブロックおよび水（または海水）の

密度、 h_s は消波工の水面下の高さ、 W は最下層ブロックの重量である。また、 S は消波工下端の単位幅（単位延長）あたりの全面積を、その延長に設置される最下層ブロックの個数で除した値である。 W は気中の場合は $\rho_b v$ （ v : ブロック単体の体積）、水中の場合は $(\rho_b - \rho_w)v$ である。

この式(1)は、最下層ブロックに作用する上載荷重が、消波工全体の見かけの密度や浮力、消波工の高さ、最下層に配置されるブロックの個数に依存すると仮定して導いている。また、比較的簡便な式であり、ブロックの形状が異なっても適用できる形式を取っている。

そこで、ブロックの形状や測定対象とする最下層ブロックの位置、およびブロックの大きさが上載荷重分布に及ぼす影響を測定実験にて調査するとともに、測定結果と式(1)との比較も行った。

(1) ブロックの形状が上載荷重分布に及ぼす影響

まずはブロックの形状による上載荷重分布の違いを明らかにするための実験を行った。実験は図-6の2種類の消波ブロックを用いた。模型縮尺は1/56とし、表-1に示す諸元の模型を使用した。この場合のブロック質量の現地量は四脚ブロックが83.4t、楔形ブロックが92.4tとなる。これらは、いずれも現在国内で使用されている消波ブロックの最大クラスの条件である。

実験断面および測定装置を図-7に示す。図中の消波工高さ400mmは、四脚ブロックの大型（50t型～80t型）の施工実績を調査して決定した。測定対象とした最下層ブロックの位置は図中に示した鉛直壁（ケーソン）前面（測定位置[A]）とし、奥行き方向には中央とした。実験には模型台（ $H: 0.6\text{m} \times B: 0.5\text{m} \times L: 1.0\text{m}$ ）を使用し、測定ブロックの下面に樹脂製の台座を接着、その台座とロードセル、およびロードセルと模型台底面は動かさないよう固定した。また、ロードセルの周囲には石が入り込

まないよう板で仕切りを設け、捨石マウンド上面となる箇所にサンドペーパーを貼り付けた蓋を被せ、測定位置周辺の最下層ブロックが滑らないよう対策を講じた。なお、蓋は台座周辺に切り込みを入れ、蓋と台座が接触しないようにしている。

実験ケースは、完全な気中の状態で消波ブロックを積み上げた場合（Case1）と、水位（ $h_s=200\text{mm}$ ）がある場合および消波工が完全に没水した場合（Case2 および

図-5 上載荷重モデル

図-6 実験に使用したブロック（左図：四脚ブロック、右図：楔形ブロック）

表-1 ブロック模型の諸元

名 称	質量 $M(\text{g})$	密度 $\rho_b(\text{g}/\text{m}^3)$	体積 $v(\text{cm}^3)$	空隙率 $p(\%)$
四脚ブロック	474.8	2.374	200.0	50
楔形ブロック	526.2	2.321	226.7	51

図-7 実験断面および実験装置（単位：mm）

図-8 実験(積み上げ)状況

図-9 四脚ブロック単体に作用する上載荷重(測定位置[A])

図-10 楔形ブロック単体に作用する上載荷重(測定位置[A])

Case3) の 3 ケースとした。測定は Case1→Case2→Case3 を 1 サイクルとし、ケース毎に上載荷重を測定した。模型を積み上げる前に荷重初期値をゼロとし、1 サイクル終了後、測定対象ブロック以外の模型を撤去し、この状態で再度初期値をゼロに戻し、模型を積み替える。この一連のサイクルを 100 回程度繰り返した。なお、模型の積み上げは実際の施工をできるかぎり模擬することとし、1 層目は規則的な配置で並べ、2 層目より上層は、ブロック同士の隙間に、ブロックの脚を挿入していく方法を基本としながらランダムに積み上げた(図-8)。

実験結果を図-9 および図-10 に示す。ここで、図の横軸は測定された荷重 P_p を式(1)から計算された上載荷重 P_c で無次元化している。図の棒グラフは、 $\Delta(P_p/P_c)=0.2$ 刻みの階級毎の出現回数 n と試行回数 N を用いて無次元化し、相対度数として表したものであり、実線(曲線)はガンマ確率分布である。また、 μ , σ , σ/μ , ρ はそれぞれ荷重の平均値、標準偏差、変動係数、およびガンマ確

率分布と相対度数分布との相関係数である。

まず平均値に着目すると、ブロックの形状や実験ケースに関わらず平均値は P_c の 90% 程度であることがわかった。よって、上載荷重の平均値は式(1)にて評価できる可能性があることが確認された。

次に変動係数に着目すると、その値は 40%~70% 程度と大きい。これは、測定対象ブロックに接触している周囲および直上に置かれたブロックの位置や姿勢(向き)が試行ごとに異なり、これにより測定対象ブロックへの荷重伝達経路が異なるためと考えられる。

また、ケース毎に変動係数を比較すると、四脚ブロックと楔形ブロックともに Case1→Case2→Case3 の順に値が大きくなっている。これは、水を注水していく(水位が上昇する)に従って徐々に浮力が作用していき、これによりブロック同士の接触状態に変化が生じ、この変化のばらつきが Case1 の結果に付加されていったためと考えられる。よって、最初から水位のある状態からブロッ

図-11 断面形状による周囲との接触状態の模式図

図-12 四脚ブロック単体に作用する上載荷重 (測定位置[B], $M=474.8g$)

クを積み上げていけば Case1 の変動係数程度になるものと推測される。

さらに、2種類のブロックで変動係数を比較すると、すべてのケースで楔形ブロックのほうが値は大きい。これは2つの理由が考えられ、まずは、立体形状の違いである。四脚ブロックは、重心から放射状に脚が伸びた形状であり、重心を通る回転対称軸が楔形ブロックよりも多い。よって、このような形状は積み上げ時に姿勢を回転させても回転前の姿勢と同じになりやすい。これは、積み上げ時の姿勢に方向性が出にくいことでもあり、積み上げを繰り返しても同じような姿勢が再現されやすいことにも繋がっている。その結果、試行による姿勢のばらつきが小さくなり、四脚ブロックの変動係数が楔形ブロックよりも小さくなったと考えられる。次に、部材断面が四脚ブロックは円形、楔形ブロックは八角形(多角形)であることである。図-11に断面形状と周囲との接触状態の模式図を示す。例えば同じ断面積の円柱を重ね合わせる場合、円柱Aを断面の軸方向に回転させて置いたとしても周囲の円柱B~Eとの接触状態やそれによって生じる空隙は同じであり、これは試行ごとに変わらない。しかし、断面が多角形の角柱であった場合、角柱Aがパターンaで置かれた場合とパターンbの状態で置かれた場合では、周囲の角柱B~Eとの接触状態や、それによって生じる空隙は等しくならず、このパターンは試行ごとに異なる。これと似た現象がブロックを積み重ねる際の噛み合わせ状態にも起きており、断面形状の違いが試行ごとのブロック相互の接触状態や個々の空隙の

図-13 上載荷重の伝達経路模式図

図-14 実験断面および実験装置 (単位: mm)

ばらつきに差を生じさせ、これが上層ブロックから下層

ブロックへ荷重が分散して伝達する際の伝達方向や荷重伝達率のばらつきに差につながり、上載荷重分布の変動係数の差につながったものと考えられる。

確率分布との相関について、実験で得られた荷重の相対度数分布と4種類の仮定した確率分布（正規分布，対数正規分布，レイリー分布，およびガンマ分布）で両者を検定した結果、ブロックの種類や測定ケースに関わらずガンマ分布が最も相関が高かった。よって、上載荷重分布はこの関数形で近似できるとした。

以上の考察より、ブロックの形状は上載荷重分布の変動係数に影響するものの、その分布はガンマ確率分布で近似でき、また平均値は式(1)からおおむね推定できることが明らかとなった。

(2) ブロックの測定位置が上載荷重分布に及ぼす影響

次に、最下層ブロックの位置による上載荷重分布の違いを調べるため、鉛直壁から2列目の位置（図-7の測定位置[B]）の上載荷重を測定した。この実験は表-1の諸元の四脚ブロックについて実施した。実験断面や実験ケース、および測定方法は前節(1)と同様である。

測定結果を図-12に示す。この実験においても上載荷重分布はガンマ確率分布が実験結果に対して相関が最も高かった。

図-9の結果と比較すると、標準偏差や変動係数に差は見られないものの、平均値が10%程度減少している。これは荷重の伝達経路が測定位置[A]と違うためと考えられる。図-13に荷重伝達経路の模式図を示す。鉛直壁側に置かれたブロックは、仮に壁面との摩擦が無いと仮定すれば壁面側に荷重は分散されない。一方、鉛直壁以外は周囲のブロックと噛み合っているため下層ブロックの全方向に分散されて伝達される。鉛直壁側は、周囲との噛み合わせの無い面が存在するため、測定位置[A]の上載荷重の平均値が測定位置[B]よりも大きくなったと考えられる。このことから、鉛直壁側とそれ以外では上載荷重分布はガンマ確率分布でともに近似できるが、平均値に違いがあることが明らかとなった。

(3) ブロックの大きさが上載荷重分布に及ぼす影響

上載荷重は、ブロック相互のかみ合わせによる接触を介して最下層ブロックに伝達されるため、接触面の表面粗さ（凸凹）によってかみ合わせによる接触状態は変化すると考えられる。

模型と実海域に使用されるブロックの材質は同じであるため、表面粗さは同じである。しかし、実海域のブロック寸法は模型よりも大きいため、ブロック寸法に対する表面粗さの割合は実海域ブロックの方が小さくなる。これは見かけ上、実海域ブロックの表面粗さが小さくなる（表面が滑らかになる）と考えることができるため、

表-2 ブロック模型の諸元

質量 $M(\text{g})$	密度 $\rho_c(\text{g/m}^3)$	体積 $v(\text{cm}^3)$	縮尺
2,950	2,345	1,258	1/30

(a) Case1

(b) Case2

図-15 四脚ブロック単体に作用する上載荷重（測定位置[B], $M=2,950\text{g}$ ）

図-16 ブロック相互の接触状態と空間（空隙）

表-3 ブロック模型の諸元 (Case4, Case5)

質量 $M(\text{g})$	密度 $\rho_c(\text{g/m}^3)$	体積 $v(\text{cm}^3)$	縮尺
662.6	2,395	276.7	1/50

ブロック相互のかみ合わせによる接触状態が変化し、これが上載荷重分布に影響を及ぼす可能性がある。

そこで、大縮尺による上載荷重測定実験を実施し、ブロックの大きさが上載荷重分布に及ぼす影響を調査した。

実験縮尺は、図-7の消波工断面を約2倍（縮尺 1/30）にし、図-14のような実験断面と実験装置とした。使用したブロックは表-2の質量 $M=2,950\text{g}$ の四脚ブロックと

し、測定位置は図-7 の測定位置[B]とした。また、測定ケースは Case1 (完全気中状態) および Case2 (水位がある場合) とした。縮尺を大きくしたことから、測定は高さ 1.0m、幅 1.0m、長さ 5.0m のコンクリート壁で囲まれた水槽内に三分力計を設置し、その上に測定ブロックを固定して行った。

実験結果を図-15 に示す。図の確率分布形はガンマ確率分布である。同じ測定位置で実験縮尺 1/56 で行った結果 (図-12) と比較すると、確率分布が図-12 の結果よりも図の右側へシフトし、平均値は Case1 で約 1.3 倍、Case2 で約 1.5 倍に増加したものの、変動係数は Case1 で 20%、Case2 で 30% 減少し、ばらつきは小さくなった。また、相対度数分布を見ると、最大値付近の相対度数に大きな差はなかった。

これらの理由を図-16 を用いて説明する。大縮尺のブロックは見かけ上の表面粗さが小さくなり、接触点近傍で局所的な滑りが生じる。これによりブロックは隙間に入り込むように滑り込む。よって、大縮尺ではブロック同士の接触によって形成される隙間の粗密が少なくなり、より均一な隙間になりやすい。隙間の粗密は上載荷重のばらつきに影響すると考えられることから、隙間の均一化が大縮尺模型の荷重平均値の増加と変動係数の減少に繋がったと推測される。

(4) ブロックの測定個数が上載荷重分布に及ぼす影響

ブロック単体に作用する上載荷重分布をブロックの形状や最下層ブロックの位置、および大きさの条件を変えて実験にて調査した結果、上載荷重分布の変動係数は 40%~60% 程度であった。

消波工に設置されるブロックの、ある延長当たりの総個数は消波工断面積から定まるため、最下層ブロック全体に作用する上載荷重は、ブロック総個数の重量から最下層に配置したブロックの個数分の重量を差し引いた値と等しくならなければならない。よって、最下層ブロック単体ではなく複数体 (以降、群体と呼ぶ) に作用する上載荷重分布のばらつきは減少すると考えられる。そこで、最下層ブロック群体に作用する上載荷重分布を実験にて確認することとした。

群体の実験は、表-3 の質量 $M=662.6\text{g}$ の四脚ブロックを用い、同時に測定するブロックの個数は 6 体とした。実験断面および実験装置を図-17 に示す。最下層ブロック 6 体は鉄板上に固定し、その鉄板を三分力計の上面に固定した。

実験ケースは完全気中状態と水位 ($h_s=30\text{cm}$) を有する場合の 2 ケースとし、それぞれ Case4、Case5 とした。荷重の測定方法はこれまでの実験と同じである。

実験結果を図-18 に示す。ここで、横軸の上載荷重 P_p の値は測定値を 1/6 にし、ブロック 1 体あたりの荷重に

図-17 実験断面および測定装置 (単位: mm)

(a) Case4

(b) Case5

図-18 四脚ブロック群体に作用する上載荷重 ($M=662.6\text{g}$)

図-19 隣接する最下層ブロックに作用する上載荷重

図-20 波力による接触力と間隙水圧の伝播

置き換えている。また、図中の曲線はガンマ確率分布であるが、変動係数が小さいため正規分布に近い形状となっている。

両ケースを図-9 や図-12 のブロック単体の結果と比較すると、実験の試行回数は少ないものの、平均値は同程度であった。ただし、平均値からのばらつきは非常に小さくなり、変動係数は約 10%と、ブロック単体の 1/4 程度となった。これは、個々のブロックは図-9 や図-12 のような荷重分布であっても、ある最下層ブロックに着目した時の試行の結果は、隣接するブロックの試行の結果に影響を及ぼしていることを意味している。図-19 に示すように最下層のブロックの上方のブロック D は、隣り合う最下層ブロック A と B の隙間に設置される。ブロック D に伝達された上載荷重がブロック A およびブロック B に分散して伝達されるが、その荷重伝達率は両者で等しくはない。ある試行で一方に作用する荷重が大きければ、もう片方は小さくなる。ただし、その合計はブロック D に伝達された荷重に等しくなる。よって、ブロック A の測定結果はブロック B に影響を及ぼすことになり、これが結果的に変動係数を大きく減少させたと考えられる。

3. 波作用下の最下層ブロック単体に作用する上載荷重

波作用下においては、消波工の表層ブロックに波力が作用し、その力が図-20 に示すようにブロックの接触を介して最下層ブロックに接触力として伝播する。また、消波工内部ではブロック間隙水圧（以降、間隙水圧と呼ぶ）が伝播する。よって、波作用下の最下層ブロックには静穏下の上載荷重以外に接触力や間隙水圧による力も付加されることになる。それらはある一定の荷重ではなく変動荷重として最下層ブロックに作用することになり、上載荷重の設計用値を考える上では重要なものとなる。

そこで、最下層ブロックに作用する変動荷重の特性を明らかにするため、波作用下における荷重の測定実験を実施した。なお、この研究での変動荷重の定義は、波作用前の荷重（静穏時の上載荷重）をゼロとした場合の、水位変動により増減する浮力の変動量、波力による接触力の変動量、および間隙水圧の力の変動量、これら 3 つの合力を変動荷重としている。

(1) 実験断面および実験ケース

実験は長さ 29m、幅 0.5m、高さ 1.0m の造波水路内のモルタル床(1/30 勾配)上に、図-21 の断面を設置して行った。実験縮尺は 1/83.9 とし、ブロック模型は表-4 の諸元の $M=139.9\text{g}$ の四脚ブロックを使用した。また、水面か

図-21 実験断面および測定装置（単位：mm）

表-4 ブロック模型の諸元

質量 $M(\text{g})$	密度 $\rho_c(\text{g/m}^3)$	体積 $v(\text{cm}^3)$	縮尺
139.9	2.359	59.3	1/83.9

表-5 実験ケース

波浪種別	測定荷重	周期 $T(\text{s}), T_{1/3}(\text{s})$	波高 $H(\text{cm}), H_{1/3}(\text{cm})$
規則波	変動荷重	1.53	2.5, 5.7, 9.0, 11.3, 15.0
	間隙水圧の荷重		
不規則波	変動荷重	1.53	5.7, 9.0, 11.3

図-22 間隙水圧による荷重測定装置

ら消波工天端までの高さは、港湾施設の技術基準⁴⁾を参考に、防波堤の安定の検討に用いる有義波高 $H_{1/3}$ の 0.6 倍とし、 $H_{1/3}$ は四脚ブロックの大型（50t 型～80t 型）の施工実績の調査結果からブロックの安定限界波高とした。測定対象ブロックは鉛直壁（ケーソン）前面とし、延長方向は中央とした。また、測定装置は 2.(1) で使用したものと同様としたが、水位変動との関係を調べるために側面から見て測定対象ブロックの上向き脚中央の位置に波高計を設置した。

実験ケースを表-5 に示す。測定は規則波と不規則波とし、波高は規則波で $H=2.5\text{cm} \sim 15.0\text{cm}$ （現地量で約 $2.0\text{m} \sim 12.5\text{m}$ ）までの 5 種類、不規則波で $H_{1/3}=5.7\text{cm} \sim$

図-23 変動荷重の波形 (規則波: 1 回目) (左図: $H=2.5\text{cm}$, 右図: $H=15.0\text{cm}$)

図-24 間隙水圧の荷重の波形 (規則波: 1 回目) (左図: $H=2.5\text{cm}$, 右図: $H=15.0\text{cm}$)

図-25 変動荷重波形の上下方向への振動 (規則波) (左図: $H=5.7\text{cm}$, 右図: $H=15.0\text{cm}$)

11.3cm (現地量で 4.8m~9.5m) の 3 種類とした。ここで $H_{1/3}=11.3\text{cm}$ (現地量で 9.5m) は、四脚ブロックの最大級である 80t 型の安定限界波高相当である。また、周期は 1.53s (現地量で 14.0s) の 1 種類とし、その値は四脚ブロックの大型 (50t 型~80t 型) の施工実績を調査して決定した。

測定方法は、5 種類の波高による計測を 1 サイクルとして、規則波の条件のみブロックの積み替えを行いながら 5 サイクル実施した。また、間隙水圧による荷重が変動荷重に与える影響を調査するため、測定対象ブロックの周りを立方体に組んだ金網で囲い、周囲のブロックと接触しないよう分離し、間隙水圧による荷重のみがロードセルに伝達される装置 (図-22) を使用した実験も規則波のケースにて実施した。

(2) 規則波の実験結果

図-23、図-24 に規則波実験における $H=2.5\text{cm}$ と $H=15.0\text{cm}$ の変動荷重の波形と間隙水圧の荷重波形を示す。ここで、図の縦軸は荷重の初期値からの変動荷重を示しており、プラス側は最下層ブロックに対して鉛直下向き方向の荷重を示しており、マイナス側は鉛直上向き方向の荷重である。

まず間隙水圧による荷重と変動荷重の波形を比較する

図-26 波作用中の消波工断面変化

と、間隙水圧による荷重は変動荷重に対して十分小さいことがわかった。このことから、最下層ブロックに作用する変動荷重は、間隙水圧による荷重の影響はほとんど無いと考えることができる。

次に図-23 の水位波形と変動荷重の波形を比較すると、 $H=2.5\text{cm}$ の変動荷重波形は周期的な正弦波振動となっており、水位波形とはほぼ完全な逆位相の関係となっている。一方、 $H=15.0\text{cm}$ の波形は水位が上昇すると荷重が減少し、逆に水位が低下すると荷重が増加するという現象は $H=2.5\text{cm}$ の時と同様であるものの、波形自体は完全な逆位相とはなっていない。特に、水位上昇がピークとなる時間帯前後で両者の波形には違いが生じている。これは、波高が小さい場合の変動荷重は水位変動による浮力の増減が支配的になるが、波高が大きくなると波力による接

図-27 変動荷重と H/h の関係 (左図: a_v , 中央: $P_v(+)$, 右図: $P_v(-)$)

触力の増減も影響しているためと考えられる。この影響はブロックを鉛直上向き方向に押し上げる力が作用する時 (荷重波形が負の値となる時) に顕著に現れている。

図-25 は, $H=5.7\text{cm}$ と $H=15.0\text{cm}$ の実験開始から $T=60\text{s}$ までの変動荷重波形を示したものである。 $H=5.7\text{cm}$ のケースは, 回数によって荷重の大きさ (振幅) に差はあるものの周期的な正弦波振動である。荷重の差は, 1 回ごとに模型の積み替えを行っているため, 測定ブロックと周囲のブロックとの初期の接触状態が異なることによる。しかし, $H=15.0\text{cm}$ では, それ以外に変動荷重波形全体が上方向, または下方向にシフトしていく傾向が見られた。この現象は越波が始まる $H=9.0\text{cm}$ から生じ, 造波開始 30sec 後付近から顕著に見られた。これは, 波作用中にブロックの微動によって消波工断面が徐々に変化し始め (図-26), これにより波作用前のブロック群の自重による上載荷重の伝達経路 (図-13) が時間とともに変化したことが理由と考えられる。しかし, 本研究において, 波作用中の消波工断面変化による上載荷重の経時変化量は変動荷重として定義していない。よって, 造波開始 $T=30\text{s}$ 付近までは波作用によって消波工断面が変化しない, すなわち, 波作用前の上載荷重が変化しないものとみなし, この区間の波形のうち 5 波を変動荷重の対象とした。ブロックの微動による上載荷重の経時変化量は, 今後設計用値を決定する際に部分安全係数 (荷重係数) 等で考慮することとしたい。

図-27 は, 変動荷重波形の両振幅 a_v , 波形の山の高さ $P_v(+)$, および波形の谷の高さの絶対値 $P_v(-)$ (図-28) と波高の関係を示す。図の縦軸は a_v , $P_v(+)$, および $P_v(-)$ を最下層ブロックを上面から見た時の投影面積 A (図-29) に波高相当の圧力 $\rho g H$ を乗じた値で無次元化したものである。また, 図の横軸は波高 H を設置水深 $h=28.5\text{cm}$ で無次元化した波高水深比である。図中のプロットは, 水位波形が安定した時間 (造波開始から約 24s 後) から 5 波を対象としたときの平均値であり, 2 本の折れ線で構成された実線は式(2), 式(3)および式(4)である。

図-28 変動荷重 $P_v(+)$, $P_v(-)$ と変動荷重の振幅 a_v 図-29 ブロックの投影面積 A

まず a_v の値に着目すると, 試行ごとの傾向は同じであるがばらつきが生じている。これは, 1 回ごとに模型の積み替えを行っており, 測定ブロックと周囲のブロックとの初期の接触状態が異なることによる。

$P_v(+)$ および $P_v(-)$ の値は, 波高水深比 $H/h=0.32$ ($H=9.0\text{cm}$) を境に変動荷重のばらつきが拡大しており, かつ波高ごとの値の大小関係も a_v とは異なっている。これは, ブロック積み替えによるばらつきもあるが, 大きく影響したのは, 前述した消波工断面の変化であると考えられる。消波工断面の変化は表層ブロックの姿勢変化でもあり, 姿勢が変化すれば波圧を受ける面 (受圧面積) も変化する。消波工断面変化の状態は波高ランク毎でばらつくと考えられることから, 表層ブロックに作用する波力もばらつくことになる。また, 消波工断面変化は波力による接触力の伝播経路 (図-20) も変化させる。これらの影響が, 変動荷重のばらつきを拡大させたと推測される。

また, 波高水深比 $H/h=0.32$ 以下では a_v , $P_v(+)$, および $P_v(-)$ ともに単調増加傾向にあるが, これを超えた付近からは一定, あるいは減少に転じる傾向を示している。こ

れは、2つの理由が考えられる。まずは、図-30のように、越波まで波高が大きくなると消波工の斜面を遡上する流れが生じるため、これにより表層の消波ブロックに作用する波力の向きが変化し、その結果、対象位置のブロックの鉛直方向荷重の変化量が小さくなったためと考えられる。次に、波高の増加にともない、波の非線形性によって峰が細り、谷がフラットになることで浮力の変化が小さくなったことが考えられる。よって、越波段階から変動荷重が一定、あるいは減少に転じるのは、消波工を遡上する流れと波の非線形性の影響が支配的となって現れたと推測される。

次に、図中の $H/h=0.32$ を境界に引かれた2本の折れ線であるが、これは変動荷重が $H/h=0.32$ 以下は波高とともに単調増加し、それ以降は一定値になると仮定して定めたものである。

まず a_v は定数 C_1, C_2 を用いて式(2)で表すこととした。そして、 $P_v(+)$ は式(2)に定数 C_3 を乗じたもの(式(3))とし、 $P_v(-)$ は式(2)から式(3)を減じることで表せるものとした(式(4))。ここで、定数 $C_1 \sim C_3$ は、本研究では2本の折れ線の下側に $a_v, P_v(+)$, および $P_v(-)$ の全データの90%以上が入るように決定した。

以上の規則波の実験結果より、最下層ブロックに作用する変動荷重は越波時と非越波時で傾向が変化する特性を有していることが明らかとなり、かつその値は波高相当の圧力 $\rho g H$ とブロックの投影面積 A , および波高水深比 H/h を用いて定式化できることが示された。

$$\frac{a_v}{\rho g H A} = \begin{cases} C_1 \left(\frac{H}{h} \right) + C_2 & (0.05 < \frac{H}{h} \leq 0.32) \\ 0.32 C_1 + C_2 & (\frac{H}{h} > 0.32) \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{P_v(+)}{\rho g H A} = C_3 \left(\frac{a_v}{\rho g H A} \right) \quad (3)$$

$$\frac{P_v(-)}{\rho g H A} = (1 - C_3) \left(\frac{a_v}{\rho g H A} \right) \quad (4)$$

ただし、 $C_1 = 1.70, C_2 = 0.65, C_3 = 0.40$

(3) 不規則波の実験結果

不規則波作用時の変動荷重波形を図-31に示す。水位波形と変動荷重の波形を比較すると、 $H_{1/3}=5.7\text{cm}$ の変動荷重波形は水位波形とほぼ逆位相の関係となっている。一方、 $H_{1/3}=11.3\text{cm}$ の波形は水位が上昇すると荷重が減少し、逆に水位が低下すると荷重が上昇するという現象は $H_{1/3}=5.7\text{cm}$ と同様であるが、波形自体は不規則波においても完全な逆位相とはなっておらず、水位上昇がピークとなる時間帯前後で両者の波形に違いが生じている。このことから、不規則波も規則波と同様、波高が小さい場合の変動荷重は水位変動による浮力の増減が支配的になるが、波高が大きくなると波力による接触力の増減も影響していると言え、この影響はブロックを鉛直上向き方向に押し上げる力が作用する時(荷重波形が負の値となる時)に顕著に現れている。

図-32は規則波の結果(図-27)と同様に、縦軸は変動荷重の両振幅 a_v , 変動荷重 $P_v(+)$ および $P_v(-)$ を有義波 $H_{1/3}$ 相当の圧力 $\rho g H_{1/3}$ とブロックの投影面積 A を乗じたもので無次元化している。横軸は有義波高 $H_{1/3}$ を設置水深 h で無次元化した波高水深比である。図中の最大値、1/10最大値、および1/3最大値は、1,000波(全データ)を解析対象としたときのデータのそれぞれ最大値、最大値から並び替えた時の上位1/10の平均値、および上位1/3の平均値である。また、図には式(2)～式(4)も図示している。なお、式中の H は $H_{1/3}$ に置き換えている。

図より、波高水深比 $H_{1/3}/h=0.32$ 以下で変動荷重は増加傾向であり、それを超えると一定もしくは減少傾向にあり、規則波の結果と同様であった。また式(2)～式(4)について、 a_v の $H_{1/3}/h=0.32$ 以下のデータの増加傾向は規則波とほぼ同様の結果を示していたため、式(2)中の C_1 は

図-30 消波工の斜面を遡上する流れ (越波時)

図-31 変動荷重の波形 (不規則波) (左図: $H_{1/3}=5.7\text{cm}$, 右図: $H_{1/3}=11.3\text{cm}$)

図-32 不規則波作用時の変動荷重と $H_{1/3}/h$ の関係 (上段: a_v , 中央: $P_v(+)$, 下段: $P_v(-)$)

1.7 とした. C_2 および C_3 は, a_v および $P_v(+)$ のそれぞれ最大値, 1/10 最大値および 1/3 最大値データにフィットするよう決定した. ただし, $P_v(+)$ の最大値データはばらつきが大きいため, この場合のみ C_3 は $H_{1/3}/h = 0.39$ ($H_{1/3} = 11.3\text{cm}$) のデータの上限を通るように決定した.

以上より, 不規則波においても規則波の結果と同様, 変動荷重は有義波 $H_{1/3}$ 相当の圧力 $\rho g H_{1/3}$ とブロック投影面積 A , および波高水深比 $H_{1/3}/h$ を用いて定式化できることが示された. なお, 変動荷重は消波工の天端高によって傾向が異なると考えられるため, 本研究にて提案した式は, 天端高が防波堤の安定の検討に用いる有義波高 $H_{1/3}$ の 0.6 倍程度の高さ, もしくはブロックの安定限界波高の 0.6 倍程度の高さに限り適用可能である.

4. まとめ

消波ブロックの構造強度の評価手法を確立するため,

消波ブロック被覆堤を対象に消波工の最下層に設置される消波ブロックに作用する静穏時の上載荷重や波作用下の変動荷重の特性を明らかにするとともに, これら荷重の定式化の可能性を探ることを目的に, 上載荷重の測定実験を実施した. 本研究にて得られた結論を以下に示す.

- 1) 静穏下における最下層ブロック単体に作用する上載荷重の分布は, ブロックの形状や最下層の設置位置, およびブロックの大きさによらずガンマ分布で近似できる特性を有していることが明らかとなった.
- 2) 静穏下における上載荷重の平均値は, 水面の位置や消波工の相対密度, 浮力, 消波工高さおよび最下層ブロック単体の支配面積を用いて定式化できる.
- 3) ブロック単体の立体形状や部材断面形状の違いは, 試行による積み上げ姿勢の方向の違いや, ブロック相互の接触状態の違い, および個々の空隙のばらつきを生じさせ, 上載荷重分布の変動係数に影響を及ぼす.
- 4) 鉛直壁側に設置される最下層ブロックの上載荷重分布の平均値は, その他の位置の平均値よりも大きかった. これは, 鉛直壁側のブロックは, 壁の影響で上層ブロックからの荷重が下層ブロックの全方向に分散して伝達されず鉛直下向きに分散されやすくなったことが理由と考えられる.
- 5) 小縮尺と大縮尺の模型実験の結果, 大縮尺での上載荷重分布の平均値は小縮尺よりも増加し, 変動係数は減少した. これは, ブロック寸法を大きくしたことで見かけ上の表面粗さが小さくなり, これが接触面近傍で局所的な滑りが生じさせ, その結果, ブロック同士の接触によって形成される隙間が均一化されたことが理由と考えられる.
- 6) 最下層ブロックの群体に作用する上載荷重分布の変動係数は, ブロック単体の 1/4 程度にまで大きく減少した. これは, ある最下層ブロックに着目した時の試行の結果は, 隣接するブロックの試行に影響を及ぼしていることを意味している.
- 7) 波作用下における最下層ブロックに作用する変動荷重は, 消波工の間隙水圧による荷重の影響はほとんど無いことが規則波の実験にて明らかとなった. また, 波高が小さい場合は浮力の増減が支配的であり, 波高が大きい場合は浮力以外に波力がブロックを伝播して作用する接触力の増減が支配的となる特性を有していることが規則波ならびに不規則波の実験にて明らかとなった.
- 8) 波高の増加に伴い, 変動荷重のばらつきが拡大した. これは, 表層ブロックの姿勢変化により波圧を受ける面 (受圧面積) にばらつきが生じたことと, 消波工断面の変化によって波力による接触力の伝播経路が変化したことが影響したと考えられる.

- 9) 変動荷重は規則波, 不規則波ともに, 波高の小さい非越波時は波高の増大とともに単調に増加するが, 越波が起きた段階あたりからは一定, または減少傾向に転じた. これは, 消波工を遡上する流れと波の非線形性の両者の影響が支配的となって現れたと推測される.
- 10) 規則波および不規則波の実験から, 波作用下における最下層ブロックに作用する変動荷重は波高相当の圧力, または有義波相当の圧力と最下層ブロックを上方から見た時の投影面積, および波高水深比を用いて定式化できる.

参考文献

- 1) Noboru, S., Iwanami, M., Yamamoto, M. and Nishiwaki, I.: Structural Performance Evaluation of New-type Wave Dissipating Concrete Block, *Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.3436-3448, 2008.
- 2) 有川太郎, 池辺将光, 大寄菜々子, 黒田豊和, 織田朋哉, 下迫健一郎: 消波ブロックによるケーソン壁面押し抜きせん断破壊に関する研究, 港湾空港技術研究所, Vol.44, No.1, 2005.3.
- 3) 山口貴之, 別府万寿博, 大野友則: 衝撃砕波を受ける消波ブロックの直立壁への衝突現象に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol.50, pp.711-715, 2003.
- 4) 社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻), pp.819, 2007.11.

(2016.11.11 受付)

SURCHARGE LOAD ACTING ON THE BLOCK IN THE BOTTOM-LAYER OF BREAKWATER COVERED WITH WAVE-DISSIPATING CONCRETE BLOCKS

Satoshi NOBORU, Shin-ichi KUBOTA, Akira MATSUMOTO, Nobuhiro CHIJIWA,
and Mitsuyasu IWANAMI

A structural performance evaluation method for wave-dissipating concrete blocks has not yet been established. In this study, surcharge load acting on the block sitting in the bottom-layer of breakwater covered with wave-dissipating concrete blocks was examined through model experiments against permanent action and variable wave action in order to clarify the characteristics of surcharge load and to investigate the possibility of the formulation of surcharge load. Based on the results of model experiments, surcharge load by permanent action could be approximated by a Gamma distribution. And, surcharge load by wave action was affected by wave overtopping. The formula for estimating surcharge load by permanent action and wave action were proposed.