

論文 消波工の最下層に設置される消波ブロックの曲げ耐荷力評価に関する基礎的研究

昇 悟志*1・千々和 伸浩*2・岩波 光保*3

要旨：現在，国内では古くから多くの種類の消波ブロックが使用されているが，それら消波ブロックの構造性能に関する統一的な評価手法は未だに確立されていない。そこで本研究では国内実績が最も多いタイプの消波ブロックを用いて静的載荷試験を実施し，消波ブロックの曲げ耐荷力の定式化を試みた。実験結果より，消波ブロックの曲げ破壊強度にも寸法効果が存在することが確認されたとともに，曲げ耐荷力を既往の曲げ強度式を拡張した形で表し，部材係数を用いた設計曲げ耐荷力を提案した。また，非線形有限要素解析を実施し，消波ブロックの曲げ耐荷力を解析にて評価できる可能性があることを示した。

キーワード：消波ブロック，曲げ耐荷力，静的載荷実験，非線形有限要素解析

1. はじめに

現在，日本国内では防波堤に作用する波力や反射波，また防波堤を乗り越える越波量の低減を目的に図-1 に示した消波ブロック被覆堤が数多く建設されている。

近年，港湾施設の大規模化により，防波堤はより水深の深い沖合へ建設されるようになり，また，到達する波高も大きくなっている。よって，コンクリートケーソンやコンクリート製の消波ブロックの大きさも増加しつつあり，これは結果的に防波堤の大型化につながっている。

これにより，到達する波高が増大し，消波ブロックに作用する波力は大きなものになる。また，消波ブロックで被覆する断面も巨大となり，最下層に置かれた消波ブロック（図-2）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。よって，これらの作用に対して十分な構造強度を有していなければ消波ブロックは損傷し，消波工の沈下や散乱が生じることで，ケーソンへの作用波力が増大することとなる。その結果，ケーソンの滑動や転倒により防波堤が破壊し，港内の静穏度が低下して港湾の機能が損なわれる。

現在の消波ブロックの種類や大きさは，式(1)に示した質量算定の基本式から決定されることが多い。防波堤に

到達する波高 H や消波工形状が既知であれば，質量 M は K_D 値によって決まる。この K_D 値は，ブロック相互の噛み合わせ効果を示す定数であり，この値はブロックのタイプ（形状）によって異なる。噛み合わせ効果の高いブロック形状は K_D 値が大きくなり，ブロックの大きさを小さくできる。よって，ブロックの大きさや形状は波高 H と K_D 値で決定され，消波ブロック単体の構造性能はブロック形状や大きさの決定に反映されていないのが現状である。

$$M = \frac{\rho_r \cdot H^3}{K_D (\rho_r / \rho_w - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

ρ_r ：ブロックの密度 (t/m^3)， ρ_w ：海水の密度 (t/m^3)， α ：消波高のり面と水平面のなす角度。

消波ブロックの構造性能に関しては，これまでいくつかの研究^{1), 2)}が行われているが，ブロックの種類に関わらず同一尺度で構造性能を評価できるような手法の提案までには至っていない。また，消波ブロックに作用する外力についても，最下層に置かれたブロックへの上載荷重だけでなく，波によってブロックが移動・転落することによる衝突荷重，波によってブロックが動揺した時の

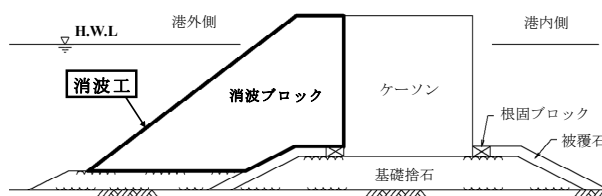


図-1 消波ブロック被覆堤の断面（例）

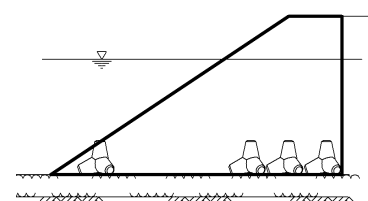


図-2 最下層に設置される消波ブロック

*1 (株) 不動テトラ ブロック環境事業本部総合技術研究所材料・構造研究室 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

繰返し荷重などがあるが、それら作用の評価も統一化されていない。

そこで、本研究では、まず消波ブロックの構造性能に関する性能規定を提案した。この提案には消波ブロックの曲げ耐荷力の評価が必要となるため、既存の消波ブロックを対象として静的載荷試験を実施し、消波ブロックの曲げ耐荷力の定式化について検討を行った。また、この曲げ耐荷力が解析にて評価できるのか、その可能性を探ることを目的に非線形解析も実施した。

2. 消波ブロックの構造性能に関する性能規定の提案

日本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。無筋コンクリートであるが故に一度ひび割れが発生すれば損傷は一挙に進行し、場合によっては連鎖的に周囲のブロックの損傷も誘発する可能性がある。よって消波ブロックの構造性能をブロックの種類や大きさに関わらず同一尺度で評価することは重要であり、そのためには統一した評価手法を確立する必要がある。これが確立できれば、式(1)と構造性能の両面から消波ブロックの種類や質量を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わたり合理的に維持できるものとする。

そこで、著者らは以下のような消波ブロックの構造性能に関する性能規定を提案することとした。

- ① 消波ブロックの脚の曲げ破壊に対する耐荷力の設計値 R_{ud} が消波工断面の最下層に置かれた状態での上載荷重の設計値 P_{ud} を上回ること。

$$\frac{R_{ud}}{P_{ud}} \geq 1.0 \quad (2)$$

- ② 波浪による動揺によって繰返し衝撃荷重を受ける消波ブロックの脚の曲げ破壊に至る衝突回数が、一定の衝突回数を上回ること。

本研究では、①の規定の中の曲げ耐荷力の設計値 R_{ud} に着目して検討を行った。

3. 本研究のフロー

本研究の流れを図-3に示す。

現在、国内で使用されている消波ブロックは 30 種類以上あり、質量も最大で 100t 級が存在し、そのほとんどが無筋である。そこで、それら消波ブロックの中で最も多くの実績がある 4 脚タイプ（図-4）を選定した。

次に、想定する上載荷重の作用モデルを図-5のように設定した。上載荷重の作用位置は事前の線形 FEM 解析によって、接地した脚の引張応力が一番大きくなる位置とした。

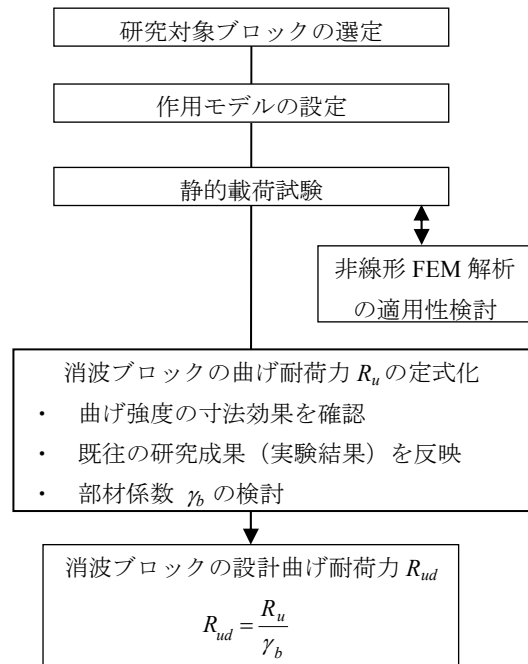


図-3 本研究フロー

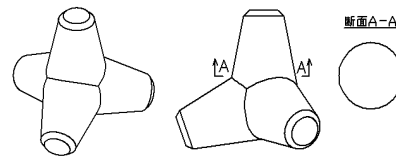


図-4 4脚ブロック

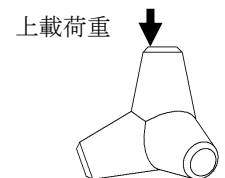


図-5 作用モデル

そして、この作用モデル下における消波ブロックの耐荷力を調査するために静的載荷試験を実施した。前述したとおり、消波ブロックは形状の種類が多く、最大で 100t 級まで存在する。大きさも 4 脚タイプを例にとれば、小型(500kg)から大型(80t)まで 18 種類ある。耐荷力を調査する上で静的載荷試験は欠かせないと思うが、当然実験可能な大きさには限界があり、全ての大きさのブロックの曲げ耐荷力を実験で調査することはできない。また、実験可能な大きさであっても種類が多く、これをすべて実験することは多くの費用と期間を要する。よって、静的載荷試験は試験体の大きさや実験ケースを絞った上でを行い、それ以外の大型ブロックの曲げ耐荷力は解析によって推定することとする。

そこで、静的載荷試験と並行して非線形有限要素解析

も実施し、解析手法含め、消波ブロックへの適用可能性を探ることとした。最後に実験値を用いて曲げ耐荷力 R_u を定式化し、部材係数 γ_b の検討により、設計曲げ耐荷力 R_{ud} を式(3)で表すこととした。また、曲げ耐荷力の定式化にあたっては、コンクリートの曲げ強度の寸法効果も考慮した。

$$R_{ud} = \frac{R_u}{\gamma_b} \quad (3)$$

一方で、作用（上載荷重）に関しては本研究とは別途、縮尺模型（モルタル模型）を用いて最下層に置かれるブロックに作用する荷重の測定実験を実施しており、現在検討中である。

4. 消波ブロックの曲げ耐荷力

3.で述べたように、実験が不可能な大型の消波ブロックの耐荷力は解析にて推定したいものの、これまでこの解析手法を無筋コンクリートの消波ブロックに適用した研究や解析精度を検証した事例は殆ど無い。よって本研究では静的載荷試験を実施し、まずはその結果と既往の研究結果を用いて曲げ耐荷力の定式化を試みた。また、複雑な形状をした消波ブロックの耐荷力評価に非線形解析が適用できるのかどうか、その可能性を探るとともに、実験結果の妥当性検証を目的に、非線形解析も実施した。

4.1 静的載荷試験

実験は、質量 40kg および 50kg の試験体をそれぞれ 2～3 体用いた。非線形解析の適用性を検証するためには載荷試験は欠かせないが、無筋コンクリートであることから、ある程度多くの試験体数が必要と考えられる。このことも考慮し、まずは実験が容易に可能な小型のものを選定した。図-6 に試験体の形状寸法、表-1 に試験体のケースを実験結果とともに示す。使用したコンクリートは W/C=60%、粗骨材最大寸法 20mm である。なお、表中の引張強度はコンクリート標準示方書式による計算値である。

実験は、図-7 および図-8 に示すようにブロックの天端面を鉛直下向きに載荷し、ブロックが破壊するまで載荷を行った。また、ブロックの接地点は水平方向変位を拘束しないよう、テフロンシートを挟み込んだ鉄板の上にブロックを接地させた。計測項目は荷重と載荷位置

の変位としたが、40kg のケースに限り、脚の下面のひずみを測定した。

実験の結果、ブロックは最大荷重到達後に脚が折れ曲がり、急激に耐荷力が低下して破壊した。ひび割れの発生位置は全ての試験体で、接地している脚 3 本のうち、載荷点側の脚下面からであり、そこから脚接合部に沿ってひび割れが進展し破壊に至った。最大荷重に着目すると、40kg 型、50kg 型ともに最大荷重は圧縮強度と概ね比例関係にある。

4.2 非線形有限要素解析

(1) 解析の概要

本解析では、構造解析ソフト midas FEA を用いた。コンクリートの構成モデルは、圧縮応力下では Thorenfeldt モデル³⁾、引張応力下では Hordijk モデル³⁾とした。材料の物性値は表-1 の値を用いた。また、コンクリートの

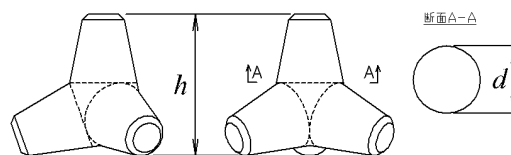


図-6 試験体の形状図

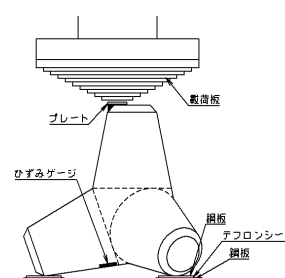


図-7 載荷方法



図-8 載荷状況

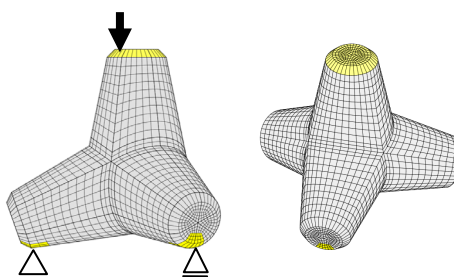


図-9 解析モデル

表-1 実験ケースと実験結果

ブロック 名称	試験体名	高さ $h(\text{mm})$	部材直径 $d(\text{mm})$	圧縮強度 $f'_{ck}(\text{N/mm}^2)$	ヤング係数 $E_c(\text{kN/mm}^2)$	引張強度 $f_t(\text{N/mm}^2)$	最大荷重 $P_{exp}(\text{kN})$
40kg 型	TP40-(1)	386	185	16.3	19.2	1.48	42.1
	TP40-(2)			24.4	19.4	1.94	48.8
50kg 型	TP50-(1)	428	204	21.7	19.9	1.79	53.1
	TP50-(2)			22.4	20.7	1.82	51.8
	TP50-(3)			16.3	19.2	1.48	43.6

ひび割れモデルは、ひび割れ面でのせん断伝達モデルを考慮する必要のない回転ひび割れモデルを採用した。

解析は、最大荷重以降の軟化領域まで変位制御による単調増加とし、修正ニュートンラプソン法により収束計算を実施した。

(2) 解析モデル

解析モデルを図-9に示す。各要素は20節点6面体要素を基本として3次元でモデル化した。基本的には無筋コンクリート要素でモデル化しているが、荷重点および支持点に限り弾性要素(図-9の黄色の要素)を適用して応力集中に対応し、構造物としての破壊現象の再現を試みている。荷重作用位置は実験と同じ位置とした。

(3) 解析結果

図-10は、最大荷重の解析値と実験値を比較したものであり、両者の関係は概ね線形関係であることが確認できた。

図-11に荷重-変位関係を示す。ここで、図の横軸は荷重点の鉛直方向変位である。解析では最大荷重以降の軟化領域まで計算できていることが確認できたものの、変位は実験値のほうが大きい。これは、ブロック接地点の形状が曲面となっており、荷重時にその曲面先端が徐々に破壊されていき、それによる局部変位が加算されたためである。特に荷重の初期段階この影響が顕著に現れている。しかし、その段階を過ぎると両者の勾配は概ね同じ傾向となる。

図-12は荷重と引張ひずみの関係を実験値と比較したものである。ここで、解析の引張ひずみは最大主ひずみである。静的荷重試験では、ひずみゲージ貼付け位置の後方、脚4本の付根側でひび割れが発生したため、ひずみが100 μ 程度まで単調増加した後は減少に転じているが、ひずみが減少に転じる直前の荷重でひび割れが発生したと推測できる。両者の関係はひび割れ発生時の荷重および最大荷重に20%程度の差はあるものの、ひび割れ発生前と発生後の傾向は一致していることが確認できた。しかし、ひび割れ発生後も全ての試験体において約20%~50%荷重は増加し続けており、直ちに破壊には至っていない。また、ひずみを保持しながらも荷重のみが増加している箇所もある(図-12の赤丸印)。これは、一旦ひび割れが生じたとしても消波ブロック自体の剛性は保持された状態であったと考えられる。剛性が保持された理由としては、本研究で用いた4脚ブロックを骨組構造で考えれば、図-13のように各脚の部材どうしが三角形のラーメン構造のように接合され、その接合部が剛結合となって脚の接地点の水平移動を拘束する効果をもたらしたことが、また、荷重試験に用いた試験体の部材断面直径は $d=200(\text{mm})$ 程度と最大粗骨材 $d_{\text{max}}=20(\text{mm})$ の10倍程度しかなく、一般的なコンクリート構造物に比べ

ば小さい。部材には曲げモーメントのみならず軸圧縮力とせん断力も同時に作用することから、ひび割れ面と骨材の噛み合いの影響が大きくなったこと、この2点がひび割れ後の耐力増加に繋がったと推測される。ひずみを保持しながらも荷重のみが増加している箇所は、後者の影響が顕著に現れた結果と考えられる。

図-14は解析における荷重点変位 $\delta=0.40(\text{mm})$ 時の最大主ひずみ分布と実験終了後のひび割れ状況を比較したものである。両者のひび割れ進展状況(破壊モード)は非常に良く一致している。

以上、実験結果と解析結果を比較した結果、最大荷重(曲げ耐力)に差はあるものの、耐力値の傾向は両者で線形関係にあったこと、ひび割れ前後の引張ひずみと荷重の関係が概ね一致したこと、さらにひび割れ進展状況が両者で一致したことの3点から、本研究に用いた非線形有限要素解析手法は、消波ブロックの曲げ耐力を評

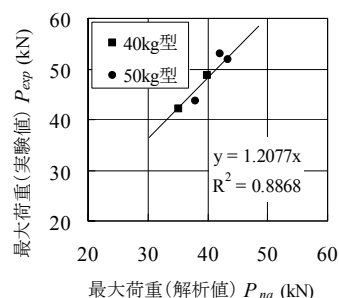


図-10 最大荷重の解析値と実験値

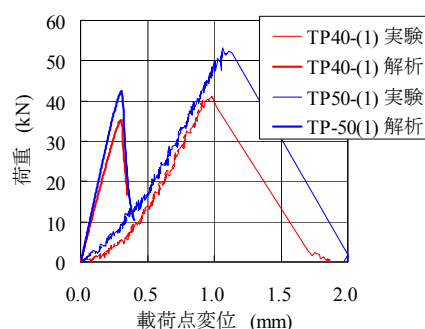


図-11 荷重-変位関係

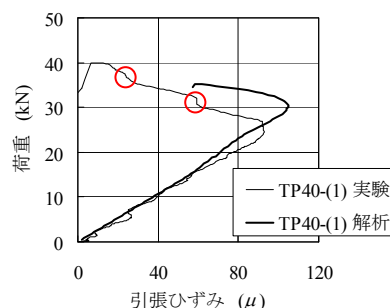


図-12 荷重-引張ひずみ関係 (40kg 型)

価できる可能性があることが示されたとともに、実験結果の妥当性も確認できた。ただし、本研究にて実施した非線形解析は小型の 40kg 型、50kg 型を対象としたものであり、この解析モデルを大型にスケールアップした場合の結果の妥当性に関しては今後の課題としたい。

4.3 曲げ破壊強度の寸法効果と曲げ耐力の定式化

消波ブロックは小型から大型まで十数種類の大きさが存在するため、当然、曲げ強度には寸法効果が存在する。この現象を把握することも消波ブロックの耐力を評価する上では必要となってくる。

六郷ら⁴⁾は、コンクリートの曲げ強度に対する寸法効果ならびに断面形状効果（正方形断面および円形断面の形状の違い）について、破壊力学的手法を用いた解析ならびに実験により検討し、曲げ強度 f_b と引張強度 f_t の比 f_b/f_t は、供試体高さ d と特性長さ l_{ch} ($=E_c G_F / f_t^2$) の比 d/l_{ch} の関数として表せるとし、以下の推定式を提案している。

$$\frac{f_b}{f_t} = 1 + \frac{1}{\alpha + \beta(d/l_{ch})} \quad (4)$$

ここに、 $\alpha = 0.74$, $\beta = 2.3$ (円形断面)

この式(4)と同じ傾向が消波ブロックの脚の曲げ強度に関しても見られるのであれば、寸法効果を取り込んだ形で消波ブロックの曲げ耐力を定式化できる。

そこで、この式(4)から計算されるコンクリート材料の曲げ強度と、静的載荷試験結果、ならびに 4 脚ブロックを用いた既往の研究結果^{2), 5)}の最大荷重から求まるブロックの脚の曲げ破壊強度を d/l_{ch} で整理して両者を比較した。なお、(4)に用いたヤング係数 E_c 、破壊エネルギー G_F 、および引張強度 f_t は圧縮強度 $f'_c = 21.0(\text{N/mm}^2)$ 、粗骨材寸法 $d_{max} = 20(\text{mm})$ としてコンクリート標準示方書の式に従ってそれぞれ計算した。消波ブロックの脚の曲げ破壊強度は図-15 から破壊位置における断面の断面係数 Z と最大荷重の実験値を用いて以下のように求めた。

$$\begin{aligned} f_b &= \frac{(R_V \cdot l_2 - R_H \cdot r)}{Z} \\ &= \frac{32(\alpha_V \cdot l_2 - \alpha_H \cdot r)}{\pi d^3} P_{\text{exp}} \\ &= \frac{10 \cdot a}{d^3} P_{\text{exp}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \alpha_V &= \frac{l}{l} \cos \theta, \quad \alpha_H = \frac{l}{l} \sin \theta, \\ a &= \alpha_V \cdot l_2 - \alpha_H \cdot r \end{aligned}$$

結果を図-16 に示す。消波ブロックの脚の曲げ破壊強度は d/l_{ch} の増加にともない減少しており、寸法効果が存在していることがわかる。しかし、式(4)と比較すると f_b/f_t の値と減少傾向に差が出ている。 f_b/f_t の値の差に着目すると、消波ブロックは 4.2(3) で述べたように各脚の部材が三角形ラーメン構造のように接合されている。これは

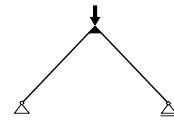
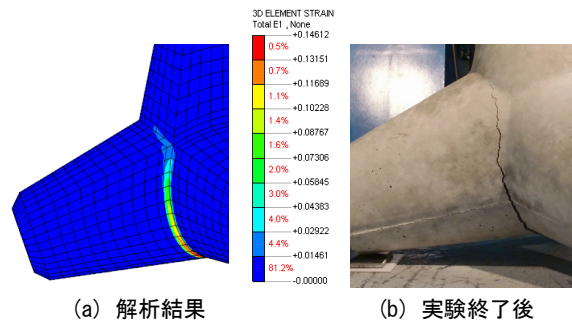


図-13 ラーメン構造



(a) 解析結果 (b) 実験終了後
(載荷点変位, $\delta = 0.40(\text{mm})$) (最大荷重, $P = 53.1(\text{kN})$)
図-14 最大ひび割れ分布と実験後のひび割れ状況 (TP50-(1))

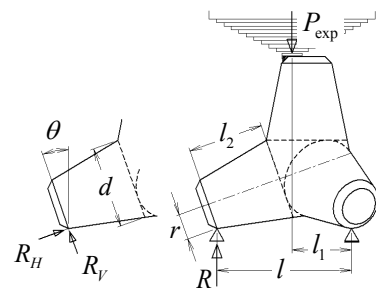


図-15 曲げ破壊強度の計算モデル

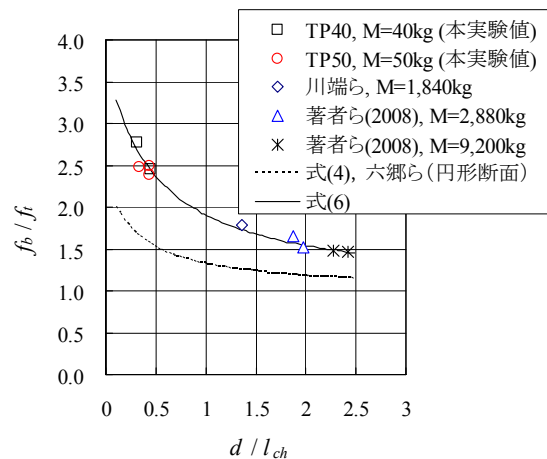


図-16 曲げ破壊強度の寸法効果

この軸力作用が消波ブロックの脚の曲げ破壊強度の増加に繋がったものと考えられる。曲げ破壊強度に関しては、本研究においては実験値を用いて新たに式(6)のように定式化した。この際、式の形は式(4)を参考として、係数 α , β は最小二乗法にて求めた。

表-2 曲げ耐力の計算値と実験値

ブロック名称	質量 M (kg)	高さ h (mm)	部材直径 d (mm)	耐力実験値 R_{exp} (kN)	耐力推定値 R_u (kN)	R_{exp} / R_u
40kg 型	40.0	386	185	42.1 48.8	41.8 49.5	1.01 0.99
50kg 型	50.0	428	204	53.1 51.8 43.6	53.5 54.6 47.3	0.99 0.95 0.92
2.0t 型 (川端ら ⁵⁾)	1,840	1,420	680	395	391	1.01
3.2t 型 (著者ら ²⁾)	2,880	1,650	790	570 570	594 552	0.96 1.03
10t 型 (著者ら ²⁾)	9,200	2,430	1,160	1130 1180	1155 1212	0.98 0.97

$$\frac{f_b}{f_t} = 1 + \frac{1}{0.36 + 0.74(d/l_{ch})} \quad (6)$$

曲げ破壊強度が分かれば式(5)を用いて消波ブロックの耐力を式(7)にて算定できる。

$$R_u = P_{exp} = \frac{k_1 \cdot d^3 \cdot f_t}{10 \cdot a} \quad (7)$$

ここに、 $k_1 = 1 + \frac{1}{0.36 + 0.74(d/l_{ch})}$

最後に、式(7)から算定される曲げ耐力と実験値を比較し、部材係数 γ_b を導入して曲げ設計耐力を検討した。ここで、部材係数は部材耐力の計算上の不確実性、部材寸法のばらつきの影響、部材の重要度、および対象部材が限界状態に達した時の構造物に与える影響等を考慮して決定される係数である。よって、消波ブロックの構造設計においても、部材係数を用いてそれらの影響を考慮することとした。

表-2 に式(7)から計算された曲げ耐力 R_u を実験値 R_{exp} とともに示す。両者の比 R_{exp}/R_u は、0.92~1.03 の範囲である。現状ではデータ数が少なく、また、最大粗骨材寸法も 20(mm)に限定してはいるものの、本研究では R_u/R_{exp} が正規分布に従うものと仮定し、その分布から累積確率 99%の値は 1.06 になることから、安全側の設計となるよう数値を丸め、 $\gamma_b=1.1$ とした。これにより、消波ブロックの曲げ耐力を安全側に評価できる。今後は最大粗骨材寸法 d_{max} や部材直径 d (ブロックの高さ h) のパラメータを変化させた静的載荷試験を実施してデータ数を増やし、式(6)との適合性を再検証していくとともに、部材係数については確率論的手法等を用いた再評価を行っていく。

5. まとめ

本研究では、消波ブロックの構造性能評価手法の確立に向け、まずは提案した性能規定にある消波ブロックの曲げ耐力の定式化と、非線形解析手法の消波ブロックへの適用可能性を探ることを目的に静的載荷試験および非線形有限要素解析を実施した。本研究により得られた

知見を整理すると以下の通りである。

- (1) 非線形有限要素解析を実施して静的載荷試験結果と比較した結果、最大荷重の解析値と実験値は線形関係となり、また引張りずみ-荷重関係やひび割れ進展状況も実験値とおおむね傾向が一致したことから、本解析手法にて消波ブロックの曲げ耐力を解析的に評価できる可能性があることが示されたとともに、実験結果の妥当性も確認できた。
- (2) 消波ブロックの脚の曲げ強度に対しても寸法効果が存在していることが確認され、消波ブロックの曲げ耐力 R_u は六郷らの提案したコンクリート材料の曲げ強度式を拡張した形で表すことが可能となった。
- (3) 消波ブロックの設計曲げ耐力 R_{ud} は、定式化された耐力 R_u と部材係数 γ_b を用いて表し、 $\gamma_b=1.1$ とすることで消波ブロックの曲げ耐力を安全側に評価できた。

参考文献

- 1) Terao, T., Terauchi, K., Uchida, S., Shiraishi, N., Kobayashi, K. and Gahara, H.: Prototype testing of Dolosse to destruction, *Proceedings of the 18th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp.2062-2078, 1982
- 2) 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
- 3) Midas-FEA Analysis Manual (理論マニュアル)
- 4) 六郷恵哲, 内田裕市, 加藤英徳, 小柳洽: コンクリートの曲げ強度の推定に関する破壊力学的検討, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.57-63, 1992.1
- 5) 川端雄一郎, 岩波光保, 加藤絵万: スラグ骨材を大量混合したコンクリートの各種特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1233, 2011.6