

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	無筋消波ブロックの構造性能評価手法に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	昇悟志
Author(English)	Satoshi Noboru
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11257号, 授与年月日:2019年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:岩波 光保,二羽 淳一郎,佐々木 栄一,千々和 伸浩,高木 泰士
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11257号, Conferred date:2019/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

無筋消波ブロックの構造性能評価手法 に関する研究

昇 悟志

要 約

1. 研究の背景

防波堤等のケーソンの前面に消波工として置かれた消波ブロックには、様々な荷重が作用するため、それらの荷重に対して消波ブロックは十分な構造強度を有しなければならない。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。よって、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举に進行し、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を有し、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。消波ブロックが作用に対して十分な構造強度を有することは重要であるものの、ブロックの選定において構造性能の評価はほとんど反映されていない。理由としては、消波ブロックに作用する荷重状態が解明されていないという問題から、消波ブロックの構造性能評価手法が確立されておらず、経験的な評価（判断）に留まっているという現状が挙げられる。

2. 研究の目的

本論文では、無筋消波ブロックの構造性能評価手法を提案することを目的として、まずは消波ブロックが保有すべき必要な構造性能を要求性能として示し、性能照査が行えるよう、要求性能を具体的に性能規定として記述し、性能規定を満足していることを確認するための具体的な構造性能照査法を提案した。次に、構造性能照査法で提案した照査式で解決すべき作用の特性や消波ブロックの耐力を水理模型実験や実大ブロックを用いた構造実験、および解析にて明らかにするとともに、作用および耐力を定式化し、設計用値を決定した。最後に、実際に建設された消波ブロック被覆堤等を対象とした照査を行い、構造性能評価手法の妥当性を検証した。

3. 主要な結論

(1) 消波ブロックへの作用の設定と性能評価法の提案

- 1) 消波ブロックへの作用を、静穏時における上載荷重（永続作用）、変動波浪による変動荷重（変動作用）、およびロッキング衝突による作用（波浪の繰り返し作用）の3種類を設定した。
- 2) 消波ブロックの構造性能評価に関し、要求性能および性能規定を規定するとともに、具体的な構造性能照査法を提案した。

(2) 消波工の最下層に位置する消波ブロックに作用する上載荷重

消波工の最下層に位置する消波ブロックに作用する上載荷重（永続作用，変動作用）の分布特性を水理模型実験にて明らかにし，上載荷重の定式化を行った．さらに，上載荷重分布の統計解析にて部分係数の検討を行い，上載荷重の設計用値を決定した．主要な結果をまとめると，次のとおりである．

- 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) 静穏下における最下層ブロック単体に作用する上載荷重の平均値は，水面の位置や消波工全体の見かけの密度，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ことが明らかとなった．
- 4) 鉛直壁側に設置される最下層ブロック単体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，大縮尺での最下層ブロック単体に作用する上載荷重分布の平均値は小縮尺よりも増加し，変動係数は減少することが明らかになった．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を生じさせ，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（複数体）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．隣り合う最下層ブロック 2 体の隙間に設置された 2 層目のブロックに伝達された荷重は，最下層の 2 体へ均等に荷重は伝達せず，片方の最下層ブロックの作用が大きければ，もう片方の作用は小さい．よって，隣り合う最下層ブロックに作用する上載荷重は相互に影響を及ぼしあっているため，複数体で見れば変動係数は単体の時よりも小さくなったと考えられる．
- 7) 最下層の四脚ブロック頭頂部のみに作用する上載荷重の平均値は，ブロック単体の上載荷重の平均値の約 40%であった．このことから，ブロックの頭頂部および接地脚には，それぞれブロック単体の上載荷重の 40%および 60%の比率で分散することが明らかとなった．
- 8) 波作用下における最下層ブロック単体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

い場合は重複波力の増減が支配的であり、波高が大きい場合は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。

- 9) 波作用下における最下層ブロック単体に作用する変動荷重は、波高の増加に伴い、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。
- 10) 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、越波が生じた段階からは一定、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。
- 11) 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単体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。
- 12) 線形 FEM 解析および上載荷重の分布モデルから、作用モデルや上載荷重の特性値を設定するとともに、統計解析によって荷重係数を算出し、上載荷重の設計用値を決定した。

(3) 無筋消波ブロックの静的曲げ耐荷力と構造性能照査

消波ブロックの実大モデルを用いた静的載荷試験を実施し、消波ブロックの脚の曲げ破壊強度の寸法依存性を明らかにするとともに、曲げ耐荷力の定式化を行った。さらに、実験データの統計解析にて部分係数の検討を行い、消波ブロックの曲げ耐荷力の設計用値を決定した。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ことを示した。最後に、上載荷重の設計用値と曲げ耐荷力の設計用値を用いて性能照査を行い、提案する消波ブロックの構造性能評価手法の妥当性を検証した。主要な結果をまとめると、次のとおりである。

- 1) 無筋の四脚ブロックを用いた静的載荷試験を実施し、ブロック脚の曲げ破壊強度に寸法依存性が存在することを明らかにしたとともに、ブロック脚の曲げ破壊強度式は、六郷らが提案したものと同様に d/l_{ch} と引張強度 f_t の関数として表せる。
- 2) 本研究の静的載荷試験や既往の研究に用いた無筋四脚ブロックを対象とした非線形 FEM 解析を実施した。その結果、最大荷重の値や荷重-変位の傾向、および荷重-引張ひずみの傾向が実験値とほぼ一致していた。また、ブロック脚の曲げ破壊強度の解析値も実験結果から導いたブロック脚の曲げ破壊強度式と一致することが明らかとなり、非線形 FEM 解析を活用することで無筋の四脚ブロックの静的曲げ耐荷力評価が可能となることが確認された。
- 3) ブロック脚の曲げ破壊強度式を用いて無筋四脚ブロックの静的曲げ耐荷力を定式化するとともに、統計的手法を用いて部分係数を算定し、静的曲げ耐荷力の設計用値を決定

した.

- 4) 曲げ耐荷力の設計用値と第4章で決定した上載荷重の設計用値を用いて、既存施設（消波ブロック被覆堤）の無筋四脚ブロックを対象とした性能照査Ⅰを実施した. その結果、ほぼ全ての施設で $P_{sd}/R_{ud} \leq 1.0$ となった. 50t 型と 80t 型の一部の施設で $P_{sd}/R_{ud} > 1.0$ となる結果となったが、この理由は、まず第4章で上載荷重分布から算定した荷重係数の値が過大に評価されている可能性があること、また、上載荷重の作用モデルを単純化したこと、更に、実際に使用されているコンクリートの実強度が計算に用いた値よりも高い可能性があることが考えられる. しかしながら、照査結果は P_{sd}/R_{ud} がほぼ 1.0 に近いものとなっていたことから、本研究にて提案した構造性能評価手法は妥当なものであると言える.

(4) 波浪による消波ブロックのロッキング衝突特性

消波工の表層に位置するブロックのロッキング衝突特性を水理模型実験にて明らかにし、ブロックの衝突速度や衝突回数の定式化を行うとともに、衝突回数の設計用値を検討した. 主要な結果をまとめると、次のとおりである.

- 1) 衝撃荷重と衝突速度の関係は、ブロックの位置（法面、天端）や周期、可動角によらず線形近似でき、これは既往の研究成果とも一致した.
- 2) 天端部に設置したブロックの脚先端の速度波形は、速度がピークとなる時間帯までは放物線を描く傾向となった. これは、波がブロックを通過し始めた直後、ブロックに急激な水位上昇に伴う大きな加速度が加わることによるものと考えられる.
- 3) 天端部に設置されたブロックの速度波形は、速度がピークを過ぎると非越波時は速度が減少し、越波時は速度が増加しつづけることが明らかとなった. 非越波時は、波がブロックを通過した後は波力の作用が小さくなるため速度は減少するが、越波時は水塊の流れによる外力がそのまま作用しつづけるため、ブロックが再加速されて増加したと推測される.
- 4) 法面ブロックの速度は天端ブロックの時と同様に速度がピークとなる時間帯まで放物線であり、それ以降は減少することなく単調増加傾向で、その速度勾配は波高の増加に比例して大きくなる傾向となった. 斜面を遡上する波の速度は波高の増加に伴い大きくなることは久保田らの研究で示されており、これが速度のピーク以降の速度勾配の増加に繋がったと考えられる.
- 5) 不規則波条件下の衝突速度は、波速と相対水深、および波高を用いて定式化できるとともに、その分布は、ブロックの位置や周期、および可動角によらず変動係数が 0.45 程度の正規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.
- 6) 可動角 20°と 35°で同じ衝突率となる時の波高を計算すると、両者で約 1.6 倍の差が生じていた. これは、ブロックの回転支点から重心位置までの水平距離の差が影響している

と考えられる。

- 7) ブロックの回転支点から重心位置までの水平距離と波高を用いて、一定期間中に作用する衝突回数ならびに衝突回数の設計用値を定式化した。

(5) 繰返し衝突時の消波ブロックの破壊衝突回数と構造性能照査

消波ブロックの実大モデルを用いた繰返し落下衝突実験を実施し、ブロックの大きさや衝突速度が破壊に至るまでの繰返し衝突回数に及ぼす影響を明らかにするとともに、破壊衝突回数の定式化を行った。そして、衝突回数とブロックの破壊衝突回数を用いて性能照査を行い、性能照査式に用いる調整係数を決定するとともに、提案する消波ブロックの構造性能評価手法の妥当性を検証した。主要な結果をまとめると、次のとおりである。

- 1) 消波ブロックの破壊衝突回数は、消波ブロックの衝突直前の衝突エネルギー E_i と消波ブロックの脚の破壊面における破壊エネルギー E_p を用いたエネルギー比 $R=E_i/E_p$ の関数とすることで圧縮強度や粗骨材の最大寸法の影響を考慮したブロックの破壊衝突回数が定式化できるが、ブロック寸法の影響までは考慮できないことが明らかとなった。
- 2) 消波ブロックの破壊衝突回数の実験値を用いて次元解析を行った結果、破壊衝突回数はエネルギー比 R と、衝突速度 v とブロック寸法 d を用いた無次元量 $(v/(gd)^{0.5})$ の関数とすることで、ブロック寸法の影響も考慮された破壊衝突回数が定式化できることが明らかとなった。
- 3) 既存の消波ブロック被覆堤施設の消波ブロックを対象とし、消波ブロックの破壊衝突回数および一定期間中に作用する破壊回数の算定式を用いた照査を2ケース試算した結果、調整係数 m を $m=4.0$ とし、一定期間中に作用する衝突回数は消波ブロックの安定限界波高の0.6倍の波高が作用したときの算定値である40回程度とすることで、妥当な照査結果となることが明らかとなった。