

高比重消波ブロック被覆堤の水理特性

Hydraulic Characteristics of Composite Breakwaters Covered with High-Density Armor Units

半沢 稔* 佐藤 弘和** 豊田 裕作***
 Minoru Hanzawa, Hirokazu Sato, Yusaku Toyota,
 松本 朗* 豊饒 智樹**** 野口 正昭*****
 Akira Matsumoto, Tomoki Bunyu and Masaaki Noguchi

By usage of a high-density concrete, the weight of armor units covering composite breakwaters or seawalls becomes lighter and the size of the armor units becomes smaller based on the Hudson's formula. The influences of the armor unit's size on the wave pressure to the caisson covered with armor units and on the other hydraulic characteristics such as a wave reflection ratio and a wave overtopping rate are discussed based on the hydraulic model test results.

Keywords : concrete armor unit, composite breakwater, hydraulic model test, high-density concrete

1. はじめに

近年、港湾・漁港等の防波堤の設置位置の大水深化に伴う設計波高の増大に対処するため、消波ブロックも大型化の傾向にある。通常比重 ($\rho = 2.3$) のコンクリートによる消波ブロックは最大80 t 程度までの施工事例があるが、施工面からはほぼ限界と考えられている。しかし、水深が深く波浪条件の厳しい所や安定上重量の割増が必要な堤頭部ではそれ以上の重量が要求される場合がある。高比重ブロックを用いることにより消波ブロックの安定性が向上し、通常比重のコンクリートによる従来工法では対応できない大波浪下への適用や、特に安定性が要求される堤頭部の処理が容易となる。また、施工面・景観面・利用面の制約条件から、消波ブロック自体の軽量化とともに、消波工断面の小規模化が要請される場合もある。このような要請に対し、高比重消波ブロックの利用が有効であり、採用事例も増えつつある。高比重コンクリートについては従来から研究がなされており、適切な配合とすることにより消波ブロックへの適用が十分可能である。消波ブロックに適用可能な高比重コンクリートは、配合により比重2.4~4.0程度であり、かなり広範囲に対応できる。高比重コンクリートでは骨材の全量あるいは一部に重量骨材を用いるが、配合は所要のコンクリート比重、コンクリートの品質および経済性等を考慮して選定される。高比重消波ブロックへの適用実績がある重量骨材としては、かんらん岩、輝緑岩、鉄鉱石、砂鉄、フェロニッケルスラグ等がある。

消波ブロックの所要重量は、通常ハドソン式により算定できる。高比重コンクリートを用いた消波ブロックの安定性については、伊藤ら^{1) 2)}、竹田ら³⁾の実験がある。これらによれば、高比重コンクリートを用いた消波ブロックの所要重量の算定においてもハドソン式を準用することができ、 K_D 値についても通常比重 ($\rho = 2.3$) の K_D 値を用いて良いことが示されている。図-1はハドソン式を前提とし、比重をパラメータとして波高に対するブロックの所要重量を示したものである。これより、例えば波高10mに対するブロックの所要重量は、比重2.3では110 t であるのに対し、比重2.5, 3.0, 3.5ではそれぞれ78 t、39 t、23 t となることがわかる。図-2は横軸にブロック比重をとり、ブロックの所要重量および大きさ(高さ)を通常比重 ($\rho = 2.3$) の場合に対する比率で示したものである。ブロック比重を2.3から2.5, 3.0, 3.5 とすることにより、ブロックの所要重量はそれぞれ2.3の場合の0.7、0.35、0.2 倍に、大きさは0.86、0.64、0.51 倍にできることがわかる。

このように安定性に対する高比重化の効果は非常に顕著であるが、高比重消波ブロックをケーソン前面の被覆として用いる場合には、ブロックの小型化や消波工断面の縮小によるケーソン本体に作用する波力の変化や、反射率・波高伝達率・越波といった水理機能の変化特性を把握しておく必要がある。本研究は、高比重消波ブロック被覆堤の水理機能、波力特性および滑動安定性に関する水理実験を実施し、その水理特性を明らかにしたものである。

- | | | | |
|---------|----|-------------|-----------------------------|
| * 正会員 | 工修 | 日本テトラポッド(株) | 応用水理研究所(〒300 茨城県土浦市東中貫町2-7) |
| ** 正会員 | | 日本テトラポッド(株) | 東京支店 |
| *** 正会員 | 工修 | 日本テトラポッド(株) | 大阪支店 |
| **** | | 日本テトラポッド(株) | 応用水理研究所 |
| ***** | | 日本テトラポッド(株) | 九州支店 |

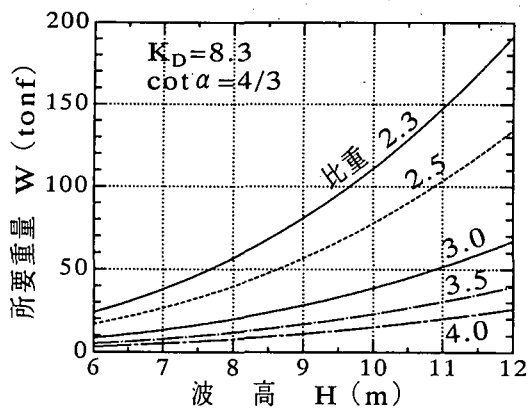


図-1 波高に対するブロック所要重量の変化

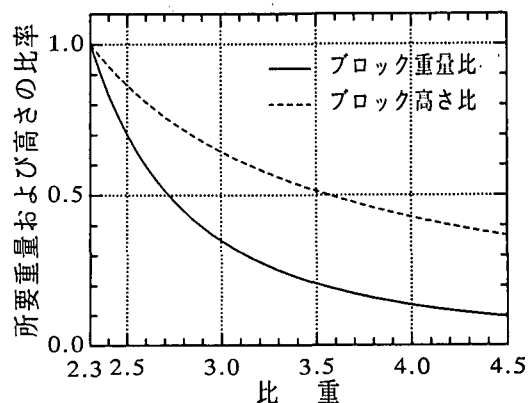


図-2 比重2.3の場合に対するブロック諸元の変化

2. 波力特性に関する実験

2-1. 実験条件および実験方法

波力実験は二次元造波水路を用い、1/30勾配斜面上に全断面消波ブロック被覆堤の模型を設置して実施した。消波ブロック（テトラポッド）の比重は $\rho = 2.3, 3.0, 3.5$ の3種類とし、ブロック重量は堤体設置水深における限界波高において安定限界となるように設定した。実験対象断面を図-3に、使用したブロック模型の諸元を表-1に示す。実験断面は、消波ブロックの天端幅を各比重毎に天端2個並びとしたもの（断面①～③）および比重3.5については、さらに比重2.3と同じ天端幅としたもの（断面④）の計4種類を対象とした。実験波は規則波であり、周期は1.5, 2.0, 2.5秒の3種類とした。波高は各周期について4ランク程度とし砕波限界波高以上の波浪も用いた。ただし、砕波限界波高以上の波高についてはデータの解析の際に仮想通過波高を用いて整理した。

波力測定はケーソン模型に3分力計および波圧計を取付け、透過波力、ブロック荷重およびブロック荷重を含めた全波力を測定した。透過波力および全波力は、各波高ランクにおいて波当てを十分実施しブロック構造が締め固められ静止ブロック荷重の変化がほとんど無くなった状態において波当てを行い測定した。また、測定は有効波数の中で実施し、各波による極大値の平均値を各波高ランクにおける波力として定義した。

表-1 ブロック模型諸元

比重	重量 W (g)	高さ h_b (cm)	天端幅 (2個) (cm)	水面位置 消波上幅 b_0 (cm)
2.3	1472.0	13.20	20.0	36.0
3.0	480.0	8.28	12.8	28.8
3.5	280.5	6.60	10.0	26.0

(*) 断面④は断面①（ $\rho = 2.3$ の天端2個並び）

と同じ天端幅としたものである。

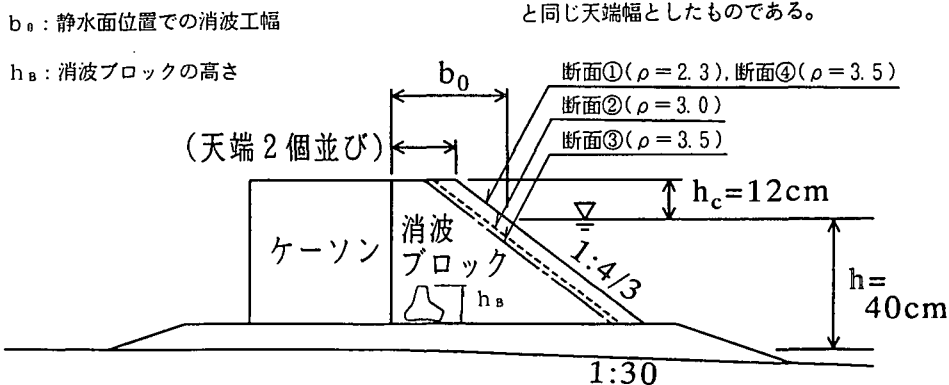


図-3 実験対象断面

2-2. 実験結果

透過波力の測定結果を図-4、5に示す。図-4は、横軸に波高水深比（ H/h ）を、縦軸に合田式により算定される波力に対する透過波力の比率（波圧低減率 λ ）をとって整理したものであり、図-5は同一条件における通常比重（ $\rho = 2.3$ ）の場合の波圧との比 $\lambda/\lambda_{2.3}$ で整理したものである。図-4には消波ブロックを十分に被覆した場合についての高橋ら⁴⁾の提案式（式(1)）を実線で示した。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 1.0 & (H/h < 0.3) \\ \lambda &= 1.2 - 2/3 (H/h) & (0.3 \leq H/h \leq 0.6) \\ \lambda &= 0.8 & (0.6 < H/h) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

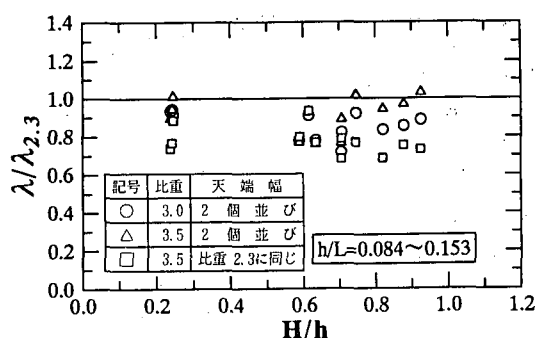
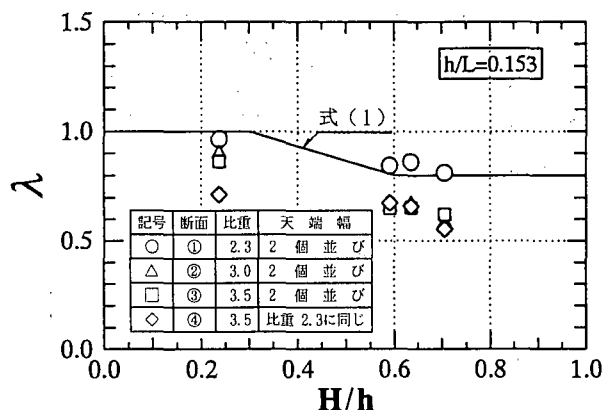


図-5 波圧低減率の比較図

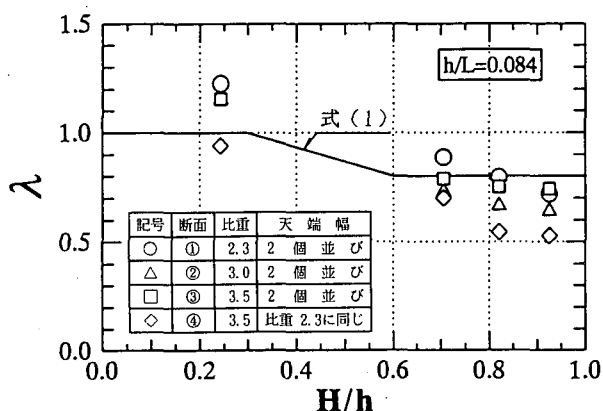
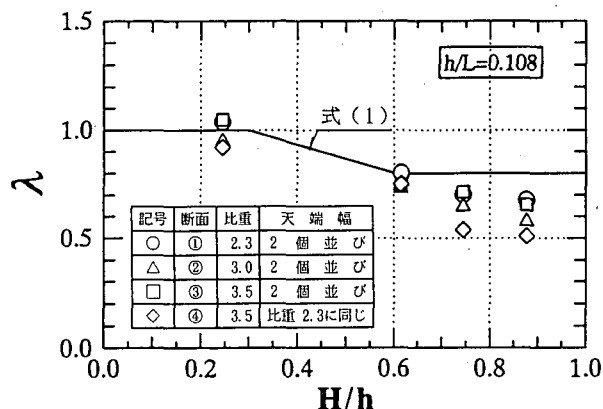


図-4 H/hと波圧低減率の関係

高比重ブロックを用いた場合、天端幅をブロック列数（2個並び）で規定すると、所要重量低減に伴うブロックの小型化により消波工断面が縮小される。しかし、高比重とした場合（断面②、③）の波圧低減率は通常比重の場合（断面①）よりも小さくなる傾向にある。通常の設計条件では $H/h > 0.6$ であり、高比重ブロックを用いた場合の波圧低減率 λ は $\lambda = 0.8$ とすれば波力をやや安全側に見積もることになる。また、比重を3.5とし、通常比重と同じ天端幅とした場合（断面④）には、波圧低減率は8割程度まで小さくなっている。この要因としては、稲垣ら⁹⁾が指摘しているように、ブロック自体の小型化により静水面での消波ブロック列数が増加したためと考えられる。

波力測定実験の結果、ケーソンに作用する波力特性（透過波力）に対するブロック比重の影響が明らかとなった。しかし、別途実施したブロック荷重を含む全水平力の測定結果は合田波力との比で1.0程度となっており設計に用いられる消波ブロック被覆堤の波圧低減率 $\lambda = 0.8$ より大きな値を示した。これは測定系（三分力計）の剛性の影響が強く現れたためであり、現実のケーソンのように微小な動揺を許容するような条件下での波力は透過波力に近いものと考えられた。そこで、実際に砕石マウンド上にフリーな状態で設置されたケーソンに作用するであろう全荷重そのものを明らかにするために波力測定実験と同一の条件で滑動実験を実施した。

3. 滑動特性に関する実験

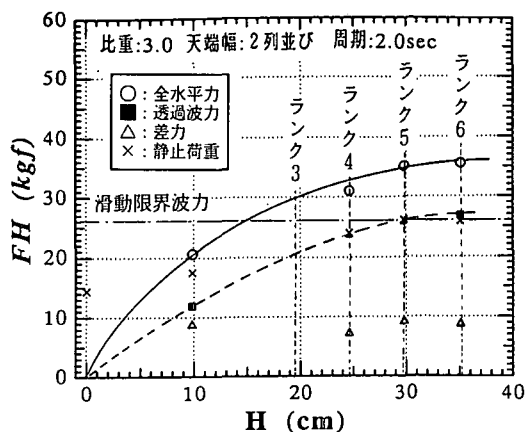
3-1. 実験条件および実験方法

滑動実験における実験条件はすべて波力実験に準じるものとし、実験対象断面は図-3に示した断面①～④の4種類とした。ケーソン重量は、周期2.0秒、波高24.6cm（波高ランク4）において、比重2.3の断面における実測波力（滑動合成波力）から求まる滑動安全率が1.0となるように設定した。実験波は規則波（周期2.0秒）とし、波高はケーソンの滑動限界となる波高周辺の3～5ランクとした。

波作用は、各波高ランクとも有効波数（13波）を10回作用させ、1回の波作用毎に滑動量を測定した。波作用は低い波高ランクの実験終了後、堤体の積みなおしを行わず、累積で順次1ランク上の波高レベルの波作用を実施した。また、実験は同一条件で3～4回繰り返して実施した。

3-2. 実験結果

作用波数と滑動量の関係の一例（断面③）を同一条件下での波力測定結果とともに図-7に示す。累積波数の中で波高は作用波数130波毎に順次1ランク上の波高へと変化させている。図-7によれば、透過波力の測定値が滑動限界波力より小さい波高ランク（ランク3,4：波数0～260）の場合、滑動はほとんど生じていない。透



ケーソンの水中重量 $W_0 = 68.0 \text{ kgf}$

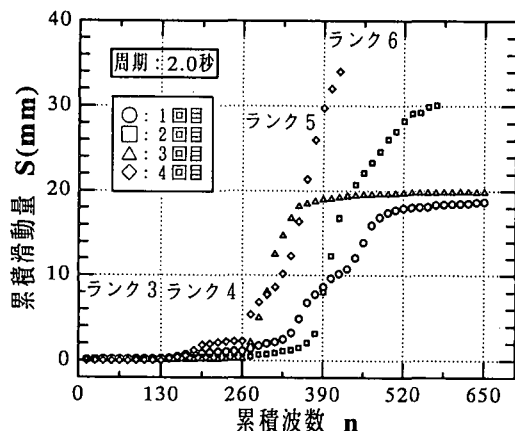


図-7 波高と滑動量・波力の関係

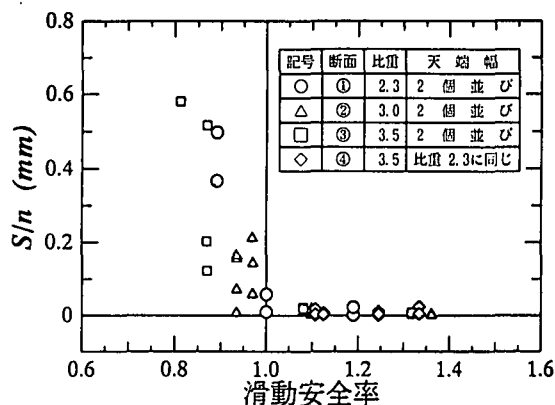


図-8 滑動安全率と滑動量の関係

透過波力が滑動限界波力にほぼ等しい波高ランク5（波高29.8cm）になるとケーソンの滑動がみられるようになっており、滑動の開始は透過波力の大小に規定されていることがわかる

ケーソン重量より求まる滑動限界波力の、実測の透過波力に対する比を滑動安全率として横軸にとり、縦軸に各波高ランクにおける1波当たりの滑動量をとって整理したものを図-8に示す。滑動安全率が1.0以上の場合にはケーソンの滑動はほとんどみられないが、安全率が1.0より小さい場合には滑動を生じており、安全率1.0が滑動限界となっている。このことから、滑動が生じるような大きな波高が作用する場合には、ケーソンに作用する外力として透過波力のみを考えれば良いことがわかる。

4. 水理機能に関する実験

4-1. 実験条件および実験方法

水理機能に関する実験は二次元造波水路を用い、波力実験と同様1/30勾配斜面上に全断面の消波ブロック被覆堤の模型を設置して実施した。堤体断面は反射率・伝達率測定用の天端2個並びを基準とした断面（波力実験と同じ断面①～④）および越波量測定用の天端3個並びを基準とした断面（断面①'～④'）の2種類である。断面④'ではブロック比重を3.5とし、天端幅は比重2.3の天端3個並びと同じ幅としている。実験波は修正ブレッツシュナイダー光易型周波数スペクトルを有する不規則波であり、有義波周期は1.5, 2.0, 2.5秒の3種類とした。波高は測定項目、周期に応じて5～10ランクとした。

反射率（ K_R ）は、堤体前面に設置した2本の波高計を用い、合田の入反射波分離推定法により算定した。伝達波高はケーソン後面より2mの位置に設置した2本の波高計から得られる波高の平均値として求め、通過波状態の堤体位置での入射波高（ $H_{1/3}$ ）に対する比として伝達率を求めた。越波量は、ケーソン背後に設置した集水枡に溜まった水を計量することにより測定した。なお、反射率・伝達率・越波量の測定とも同一条件で2回繰り返して実施した。

4-2. 実験結果

反射率の測定結果を周期毎（水深波長比毎）に図-9に示す。横軸は堤体位置における波形勾配である。どの断面についても波形勾配の増加に伴い反射率は低下する傾向であり、水深波長比が小さい（周期が長い）ほどその傾向が顕著である。また、水深波長比が小さいほど反射率は大きくなっている。断面の相違による反射率を比較すると、ブロック比重が大きくなる（ブロックが小型化され、消波工幅が小さくなる）ほど反射率は大きくなる傾向にある。しかし、同一の水深波長比（周期）に対する断面による反射率の差は最大でも0.05～0.1程度であり、同一断面に対する周期による反射率の差よりも小さい。また、消波工幅が等しい断面①と④を比較すると波形勾配の小さい範囲で若干の差はあるものの、全体的にみるとブロックの大きさが変化しても反射率は変わらないといえる。以上のことから、反射率はブロック単体の大きさに関係なく静水面位置における相対消波工幅によって見積もることができる。また、高比重化による消波工断面の変化に伴う反射率の変化は小さく実用上は問題がないといえる。

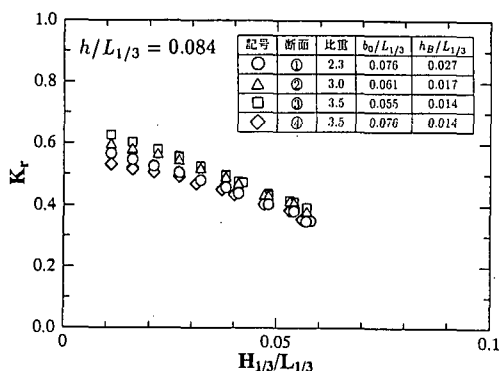
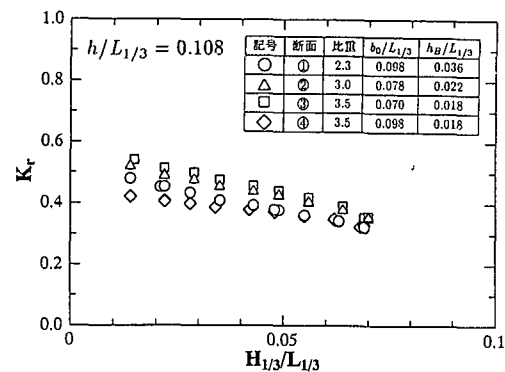
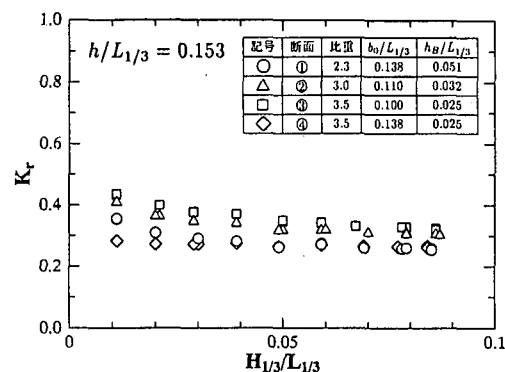


図-9 波形勾配と反射率の関係

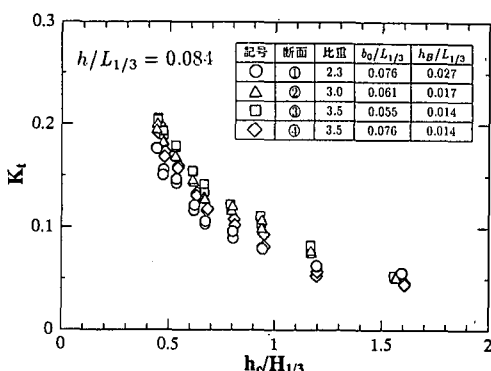
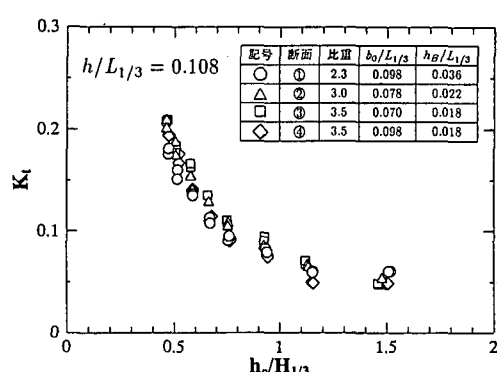
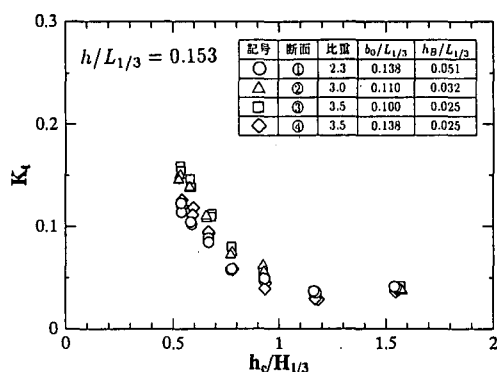


図-10 相対天端高と波高伝達率の関係

伝達率の測定結果を周期毎（水深波長比毎）に図-10に示す。横軸は堤体位置の入射波高に対する相対天端高である。相対天端高が1.0より小さくなると伝達率は急激に大きくなり、また水深波長比が小さいほど伝達率が大きい。断面による差をみると、相対天端高が1.0以上ではほとんど差がない。これは、越波する波がほとんど無く、主にマウンドを透過する波により伝達波が生じるためと考えられる。相対天端高が1.0以下の場合、高比重化により消波工断面が縮小されるにつれて伝達率は大きくなる傾向にある。しかし、同一の水深波長比に対する断面による伝達率の差は最大でも0.02~0.03程度と、同一断面に対する周期による伝達率の差よりも小さい。また、消波工幅が等しい断面①と④を比較するとブロックの大きさが変化しても伝達率は変化しない。以上のことから、伝達率も反射率の場合と同様、静水面位置における相対消波工幅によって整理することができるが、反射率と同様に比重変化による伝達率の変化は小さく実用上は問題がないといえる。

越波量の測定結果を周期毎（水深波長比毎）に図-11に示す。横軸は換算沖波波高に対する相対天端高、縦軸は無次元越波流量である。相対天端高が小さく、また水深波長比が小さいほど越波量は大きい。断面による差をみると、高比重化により消波工断面が縮小されるにつれて越波量は大きくなる傾向にある。越波量が多い相対天端高1.0以下の範囲についてみると、比重2.3の断面と比較して比重3.0では1.3~1.5倍、比重3.5では1.4~1.8倍の越波流量となっている。一方、消波工幅が等しい断面①'と④'を比較すると反射・伝達率の場合とは異なりブロック小型化の効果がみられ、断面④'の越波量は断面①'の50~80%程度まで減少している。断面①'と同一の越波量とするために必要な相対天端高を逆算すると、断面②', ③', ④'でそれぞれ1.1, 1.15, 0.9程度となる。しかし、本実験結果を高山ら⁶⁾による越波流量の推定値と比較すると、実験値のほとんどは合田ら⁷⁾が提案している真値の想定範囲の中に含まれており、実用上はどの断面についても従来どおり合田による算定図表あるいは高山らによる算定法によって越波量を推定しても良いと考えられる。ただし、わずかな断面の

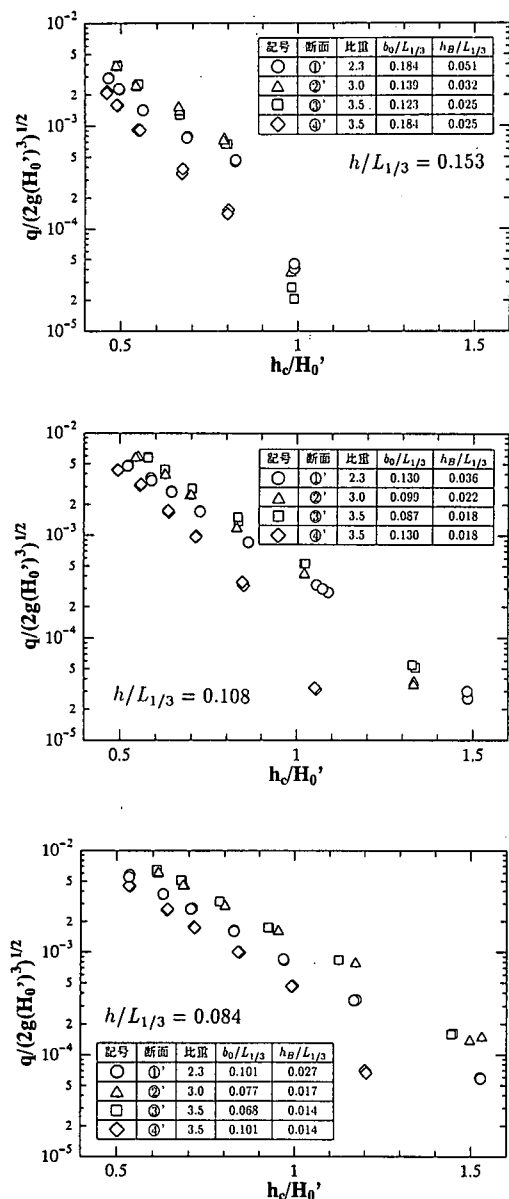


図-11 相対天端高と越波流量の関係

相違により越波量が異なってくることから重要構造物等において越波量を詳細に求める場合にはそれぞれの条件に応じた水理模型実験に基づき算定することが望ましい。

5. 結論

二次元水理模型実験により高比重消波ブロック被覆堤の波力特性、滑動特性および水理機能について検討した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

- ・高比重ブロックを用いると消波工断面が縮小されるにもかかわらず、ブロックの小型化の効果によりケーソンに作用する透過波力は小さくなる傾向にある。従って、合田式における波圧低減率 λ の値は式(1)で計算される値を用いておけば安全である。
- ・高比重消波ブロック被覆堤の滑動安定性の検討においても、波高の大きい碎波領域においてはブロック荷重を無視することができ、合田式を準用して計算される波力のみを考慮すればよい。
- ・高比重ブロックを用いて消波工断面が縮小されると、反射・伝達・越波といった水理機能は低下する傾向にあるがその差はわずかである。
- ・高比重ブロックを通常比重 ($\rho = 2.3$) と同一の断面で用いた場合には、波圧低減率は小さくなり越波量は減少する傾向にある。

以上のことから、高比重消波ブロック被覆堤の設計にあたっては実用上従来の消波ブロック被覆堤の設計手法を適用することが可能であると判断される。本研究の成果については現在、「高比重消波ブロック技術マニュアル」としてとりまとめ中である。

【謝辞】

本研究の遂行にあたっては、(財)沿岸開発技術研究センターに設置された「高比重ブロック設計施工法調査委員会」(委員長: 谷本勝利埼玉大学教授)の関係各位からご指導を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 伊藤政博, 岩垣雄一, 根本建治, 山本方人, 半沢稔: 消波ブロックの比重変化が安定性に及ぼす影響について, 海洋開発論文集, Vol. 8, (1992), pp. 75-80
- 2) 伊藤政博, 岩垣雄一, 山田卓生, 根本建治, 山本方人, 半沢稔: 高比重ブロックの安定性に及ぼす碎波帯相似パラメータの影響, 海岸工学論文集第39巻, (1992), pp. 666-670
- 3) 竹田英章, 山本泰司, 笹島隆彦, 菊地聡一, 水野雄一: 高比重消波ブロックの波浪安定性に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 9, (1993), pp. 313-318
- 4) 高橋重雄, 谷本勝利, 下迫健一郎: 消波ブロック被覆混成堤直立部の滑動安定性に関する波力とブロック荷重, 港湾技術研究所報告, 第29巻 第1号, (1990), pp. 53-75
- 5) 稲垣圭二, 野口雄二, 服部昌太郎: 消波ブロック被覆工の波力低減率とその評価指標, 第33回海岸工学講演会論文集, (1986), pp. 362-366.
- 6) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻 第2号, (1982), pp. 151-205
- 7) 合田良美, 岸良安治, 神山豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻 第4号, (1975), pp. 3-44