

施工中の捨石マウンドの耐波安定性

A STABILITY OF RUBBLE FOUNDATION OF COMPOSITE BREAKWATER IN CONSTRUCTING

藤原隆一¹・大島弘之²・榎 正浩²・松村章子³

Ryuichi FUJIWARA, Hiroyuki OHSHIMA, Masahiro ENOKI and Akiko MATSUMURA³

¹正会員 博(工) 東洋建設株式会社 鳴尾研究所(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

² 東洋建設株式会社 北陸支店(〒920-0344 石川県金沢市畝田東3-87)

³正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

Since rubble foundation of composite breakwater in construction has no armor layer, the stability of rubble stone for waves is generally low. Thus, it is important to know the stability and the extent of damage of rubble foundation in the view of construction. In the present study, hydraulic model tests were conducted to investigate a relationship between a stability of rubble foundation and crown height of rubble foundation. In the case of irregular waves, these results suggest that the extent of damage of rubble foundation and Ursell's number on the rubble mound correlate to a high degree. Added to this, it is shown that the method combined CERC's equation with CADMAS-SURF proposed by Matsumoto and Takahashi(1998) is valid for estimating a mass of rubble stone for regular waves.

Key Words: stability of rubble foundation, composite breakwater, CERC's equation, CADMAS-SURF

1. はじめに

混成堤の基礎捨石マウンドの築造期間は長期に渡る場合も多く、その期間中に大きな波浪が来襲すると、マウンド表面は被覆材によって保護されていないため、捨石が散乱する可能性がある。捨石が波浪によって散乱すると、復旧のための労力が発生するため、施工中の耐波安定性を評価しておくことは施工管理上重要である。波が発生する原因としては、台風、低気圧および季節風などが挙げられるが、特に日本海側においては、冬季季節風による波浪の来襲は避けられず、越冬時の対策には十分留意する必要がある。

混成堤マウンドの被覆石の所要質量は、港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)に示されるハドソン式¹⁾で算定できると考えられるが、施工中のマウンドに対する安定数 N_s を適切に与える必要がある。最近では、松本・高橋²⁾が混成堤マウンド被覆材の安定性を検討する設計法として、被覆材近傍の流速場に基づく精度のよい算定法を提案している。それによると、数値波動水路(CADMAS-SURF)³⁾から算定される流速場をCERCの式³⁾に適用することで被覆石の耐波安定性を判定することの可能性が強く示唆されること、また、捨石の被害率がイスバッシ

ュ定数で説明できることなどを明らかにしている。したがって、ケーソンを据え付ける前の捨石マウンドの所要質量も、同様の手法で算定できることが期待される。

また、没水構造として類似の構造形式を持つ人工リーフの被覆材の所要質量算定式³⁾の適用が考えられるが、マウンド天端水深が大きいことから適用範囲外となる場合が多い。

施工的には、所要質量に合わせた石材を用いることができるとは限らない。したがって、個々の捨石の安定性に加えて、散乱の程度、すなわちマウンド全体としてどの程度変形するかということを把握することが望まれる。最近では、波の変形計算と個別要素法を組み合わせ、捨石の変形量を推測する手法が提案されるようになった(例えば荒木ら⁴⁾、伊藤ら⁵⁾)。

しかし、いずれの方法を用いるにしても、不規則波に対する適用性は、課題として残されているのが現状である。

そこで、本研究では、施工管理上重要となる捨石マウンドの天端水深とマウンドの変形量の関係を、不規則波実験結果に基づいて検討することとした。また、個々の捨石の安定性については、松本・高橋と同様に、規則波実験によってCERCの式およびCADMAS-SURFの妥当性を検証することとした。

2. 実験方法

(1) 実験水路

実験は、東洋建設（株）鳴尾研究所の不規則波長水路（長さ55m×幅1m×高さ2m）を用いて行われた。実験時の模型配置状況を図-1 に示す。

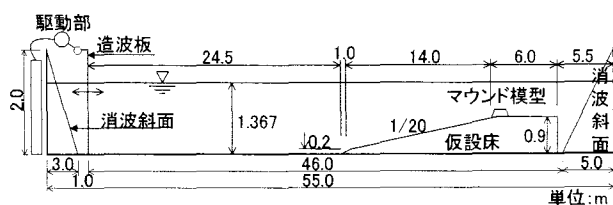


図-1 実験水路

(2) 実験ケースおよび模型マウンド

実験断面は、図-2 に示すようマウンドのり先水深 h_1 を一定（48.8cm）とし、天端水深 R を26.7cmから40.0cmまで4種類設定した。また、図中には流速の測点も併せて示した。

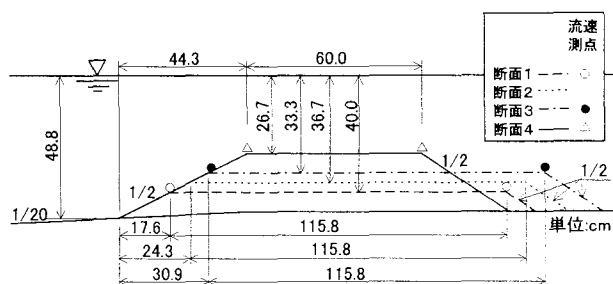


図-2 検討断面

実験では、不規則波および規則波を作用させて、波作用前後の地盤高を測定するとともに、マウンド法肩部における流速を測定した。実験ケースを表-1 および表-2 に示す。なお、不規則波の周波数スペクトルはBretschneider・光易型とし、作用波数は500波とした。規則波の場合の作用波浪数は、波形が安定していた26波とした。また実験は繰り返し2回行った。

捨石マウンドは、質量が10g程度（平均9.4g/個、標準偏差2.9g）となるように粒度を調整した碎石を用いて作成した。

表-1 マウンド変形に対する実験ケース

$T_{1/3}(s)$	$H_{1/3}(cm)$	断面	備考
2.19	23.3	3	不規則波
	26.3	1,2,3	
	30.0	3	
2.01	26.3	3	不規則波
2.37	26.3	3	

*波高は、マウンドのり先部における通過波高

表-2 流速測定に対する実験ケース

$T(s)$	$H(cm)$	断面	備考
2.19	35.0	1,3,4	規則波

*波高は、一様水深部の通過波高

(3) 測定方法

a) 入射波

不規則波に対しては、捨石マウンド設置前に造波板前面7mの一様水深部および捨石マウンド模型ののり先部において波浪検定を実施した。実験時は一様水深部のみで入射波測定を行い、波浪検定時の関係を用いて、マウンドのり先における通過波高を求めた。波高の測定は容量式波高計を用い、入・反射波分離推定法⁸⁾を用いて、入射波高を算出した。

b) 地盤高

レーザ式変位計を用いて波浪作用前後の地盤高を1cm間隔で測定した。測線は断面中央を挟む2測線（間隔50cm）とし、それらの平均値を実験値とした。

c) 流速

電磁流速計によって水平および鉛直方向の水粒子速度を測定した。なるべくマウンド表面に近い位置での測定を行うために、碎石が移動しないように碎石表面上に設置した幅20cmの金網から2cm離れた位置にセンサ部を固定した。

なお、容量式波高計によって、堤体周辺の水位変動も同時に4箇所測定した（マウンドのり先から沖側に300cmおよび131.5cm離れた測点2箇所、マウンド法肩部2箇所）。

3. 実験結果

(1) 断面変化

捨石マウンドの主要な断面変化は、沖側のり肩部付近の石が天端上または岸側斜面上に移動することで生じる。その断面変化を示す代表的な例として、断面3（ $R=33.3cm$ ）に対して $T_{1/3}=2.19s$ 、 $H_{1/3}=26.3cm$ の不規則波を作用させた場合における地盤高の測定結果を図-3 に示す。

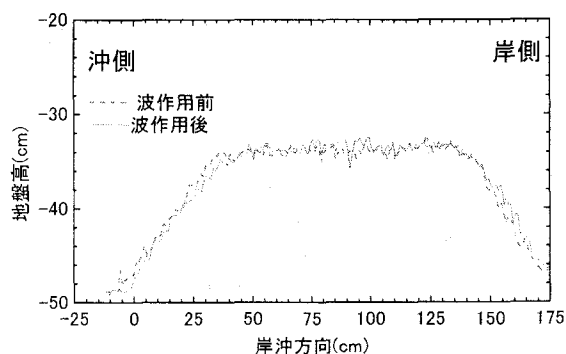


図-3 不規則波作用前後の地盤高の測定例

(2) 変形量の指標

捨石マウンドの変形量を表す指標として、以下に示す変形レベル S および欠損率 D を用いた。

a) 変形レベル⁹⁾

被覆石などの変形量を表す指標として式(1)で定義される変形レベル S は被害率の1種と考えられる。

$$S = A/D_{n50}^2 \quad (1)$$

ここに、 A ：侵食部の面積および D_{n50} ：捨石の50%粒径である。被覆石の場合、斜面勾配も影響するが、変形レベルは3つの段階が定義され、初期被災 ($S=2-3$)、中間被災および被災 ($S=8-17$ 程度) に分類されている。本検討では、マウンド沖側および岸側の侵食面積に対する変形レベルを算出した(図-4 参照)。

b) 断面欠損率

施工の観点からは、マウンド全体に対する侵食部の規模が重要となるため、式(2)に示すように初期断面に対する侵食量の割合を断面欠損率 D と定義した。

$$D = A/A_T \quad (2)$$

ここに、 A_T ：捨石マウンドの初期断面積である。なお、変形レベルと同じくマウンド沖側および岸側に対する断面欠損率を算出した。

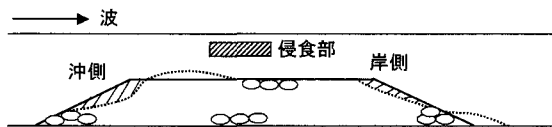


図-4 捨石マウンドにおける侵食面積

(3) 捨石マウンドの変形量

最初に、地盤高の測定値から算出された変形レベルと断面欠損率の関係を調べた。図-5 に示すように、変形レベルと断面欠損率の相関は高く、 $D \approx 5S$ の関係が認められた。したがって、捨石マウンドに対しては、変形レベルを用いても侵食部の規模

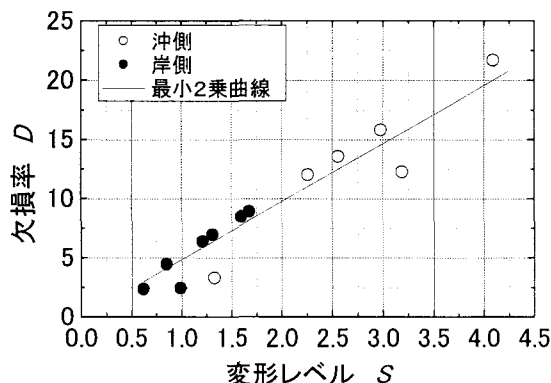


図-5 変形レベルと欠損率の関係

を定量的に把握することが可能であることが分かった。また、岸側の変形量は沖側のそれに比べて小さく、マウンドの変形量を検討するには、沖側を対象とすればよいと考えられる。したがって、以下では、沖側の変形量についての結果を示す。

次に、変形レベルが天端水深 R とどのような関係にあるかを調べた。図-6 は、変形レベルと入射波の有義波高で無次元化した相対天端水深 $R/H_{1/3}$ の関係を示すもので、 $R/H_{1/3}$ が小さくなるのに応じて直線的に変形レベルが大きくなる様子が読みとれる。しかし、詳細に見ると図中に示すように周期が一定の場合と天端水深が一定の場合では変化の傾向が異なっていた。

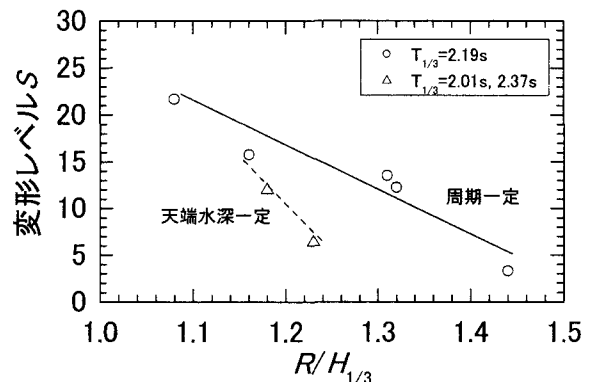


図-6 変形レベルと相対天端水深 $R/H_{1/3}$ の関係

図-7 には天端水深が同じ条件 ($R=33.3\text{cm}$) で、周期が異なるケースの変形レベルを抜き出して周期別を示した。 $T_{1/3}=2.19\text{s}$ のケースで最も変形レベルが大きくなっているのは、実験時の入射波高が他の周期に比べて約 1-5% 大きい影響もあるが、それ以上に、入射波の周期(波長)が影響しているように見える。

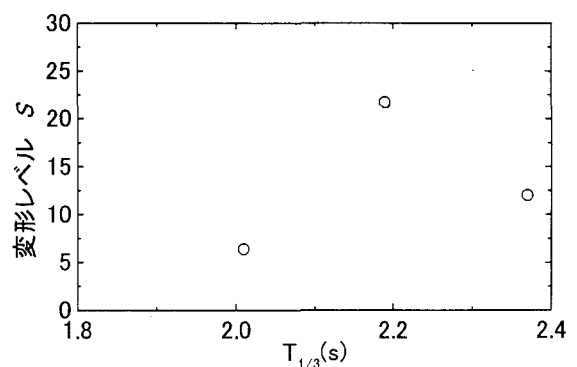


図-7 周期の影響

人工リーフの波高伝達率の算定図のように、相対天端水深に加えて波形勾配をパラメタとして加え、周期の影響を評価する方法もあるが、それには膨大なデータが必要である。本研究で対象とする捨石マウンドの変形の場合、天端水深がある程度大きく、碎波の影響が小さいことから、マウンドによる波の

変形がマウンドの変形と密接に関連していることが考えられる。そこで、堤体上の波の変形を表す指標として、波の非線形を表すアーセル数 U_r を選んだ。その場合の U_r の算出は次式で行った。

$$U_r = H_{1/3} L_{1/3}^2 / R^3 \quad (3)$$

ここに $H_{1/3}$ ：のり先における通過波の有義波高， R ：天端水深 R および $L_{1/3}：R$ および $T_{1/3}$ に対する波長である。式(3)に用いる $H_{1/3}$ としては、堤体上の波高を用いることが本来の定義と考えられるが、設計の観点からはのり先の通過波高のほうが扱いやすい。そこで、のり先における通過波高を便宜的に用いても堤体上の波の非線形性を表すには問題ないと考え、式(3)のように U_r を算出することとした。

図-8 はその結果を示したもので、ばらつきはあるものの両者の相関は高いと言える。なお、図中の曲線は最小 2 乗曲線である。 U_r が大きくなったときに S の増加割合が低下するのは、堤体の変形の外力となる水平水粒子速度 u が小さくなることに对应していると考えられる。

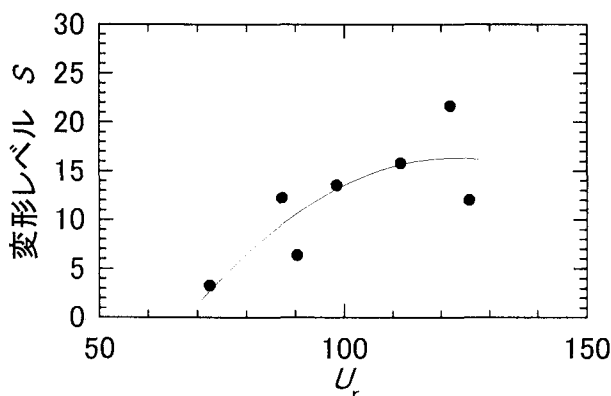


図-8 変形レベルとマウンド天端水深を用いたアーセル数の関係

波の変形には天端幅も影響すると考えられるが、今回の条件では以下のような減少が生じていると推測される。

- 1) u の大きさは波高に比例する。
- 2) 波長（周期）が長くなるほど相対的に堤体が小さくなり、入射波の波高変化（増大）も小さくなる。一方、波長（周期）が長くなると U_r は大きくなる。
- 3) また、相対天端水深 $R/H_{1/3}$ が小さくなると U_r が大きくなるが、砕波によって波高が抑えられる。
- 4) その結果、 U_r がある程度以上の条件では、堤体上の水平水粒子速度が大きくならず、変形レベルは小さくなる。

以上より、図-5 より示された変形レベル S と欠損率 D の関係 ($D \approx 5S$) および図-8 に示されるマ

ウンド天端水深 R を用いたアーセル数 U_r を結びつけることで、施工中の捨石マウンドの変形を実用的な観点から簡便に推定することが可能と考えられる。

4. CERC 式による安定評価

(1) CERC 式

CERC 式による捨石等の安定質量 $M(t)$ は、式(4)で与えられる。

$$M = \pi \rho_r \mu^6 / \{48g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3\} \quad (4)$$

ここに、

ρ_r ：捨石等の密度(t/m^3)

u ：捨石等の上面における水の流れの速度(m/s)

g ：重力加速度 (m/s^2)

y ：イスバッシュの定数（埋め込まれた石にあっては 1.20，露出した石にあっては 0.86）

S_r ：捨石の比重

θ ：水路床の軸方向の斜面勾配である。

(2) 実験結果との比較

規則波実験によって得られた水平水粒子速度を用いて式(4)により所用質量を算定した結果とそのときの石材の安定性を比較した結果を図-9 に示す。図中には、実験に用いた碎石の平均質量（実線）と標準偏差分の幅（破線）を併せて示した。なお、イスバッシュの定数としては 1.20 を用いた。石材の設置条件としては斜面部 ($\tan \theta = 1/2$) および天端上（水平部）があり、のり肩部付近はこれらの接点となることから、両者の所用算定質量を実線で結んで表示した。これを見ると、所要質量の算定結果は実験時の碎石の移動状況をよく表している。したがって、個々の石材の安定性は CERC 式によって評価することが可能であると考えられる。

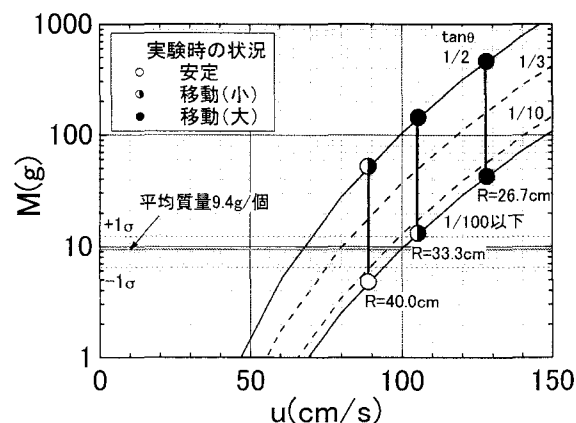


図-9 CERC 式の適用性

5. CADMAS-SURF による堤体上の流速算定

(1) 計算方法

実験状況の再現を目的とするため、計算モデルは水路での模型設置状況をできる限り正確に再現した。計算領域および計算時に用いたパラメタの一覧を、それぞれ図-10 および表-3 に示す。

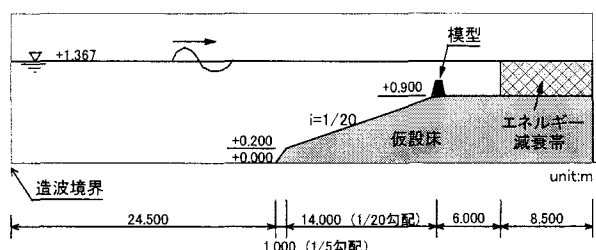


図-10 計算領域の設定

表-3 計算パラメタの一覧

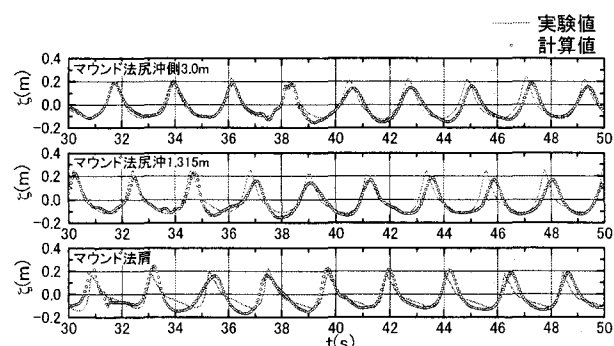
バージョン	4.0
模型位置波高	通過波の検定値
周期(s)	2.01, 2.19, 2.37
造波位置の水深(m)	1.367
水平方向格子間隔 Δx (m)	0.05 [*])
鉛直方向格子間隔 Δz (m)	0.05
移流項の差分スキーム	DONOR-0.2
計算時間(s)	50
時間刻み幅	CFL 条件および粘性項の安定条件を満たすように自動計算
ポーラス下限値	0.001
造波モデル	造波板 (PISTON)
粘性	なし
流速・圧力境界条件	スリップ
VOF 関数 F の境界条件	フリー
気泡上昇速度(m/s)	0.2
水滴落下速度(m/s)	3.0

^{*})消波のために設けたエネルギー減衰帯内部では、等比級数的(1.01倍)に格子間隔を漸増し、 $\Delta x_{\max}=0.16\text{m}$ とした。

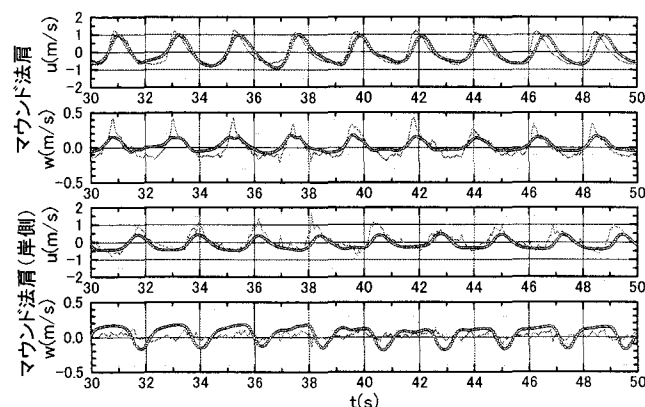
(2) 計算結果

図-11 に計算結果の一例を示す。これは、断面3に対する結果 ($T=2.19\text{s}$, $H=35.0\text{cm}$) であり、水位変動（沖側マウンドのり肩から3.0m沖側、1.315m沖側および沖側マウンドのり肩）およびマウンドのり肩の水平水粒子速度 u および鉛直水粒子速度 w に分けて示した。水位変動および流速に対するそれぞれの計算値と実験値はよく一致している。また、岸向き最大流速の計算値と実験値の差は10%程度であり、松本・高橋と同様の結果が得られた。

したがって、ケーソンを設置する前のマウンドについても、CERC式による安定性評価と数値波動水路を組み合わせて個々の石材の安定性を評価することの可能性が示されたと考える。



(a) 水位変動



(b) 流速

図-11 計算値と実験値の比較

6. 結語

施工中の捨石マウンドの耐波安定性について、本研究によって得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) ケーソン設置前の捨石マウンドの変形量はマウンド上の天端水深を用いたアーセル数と比較的高い相関を持つこと。
- 2) 基礎マウンドの変形量は、沖側の法肩付近で大きく、その場合の欠損率 D および変形レベル S の間には、 $D=5S$ の関係が認められた。
- 3) 上記の関係を結びつけることで、施工中の捨石マウンドの変形量を実用的な観点から簡便に推定する可能性が見いだされた。
- 4) 個々の石材の安定性は、混成堤マウンドの場合と同じように、数値波動水路から算定される流速場をCERCの式に適用することで判定できる可能性が高い。

今後は、DEMとの連成解析による変形モデルの構築や不規則波に対する数値モデルの構築を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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，pp151-159, 1999.
- 2) 松本 朗・高橋重雄：流速場に基づく混成堤マウンド被覆材の高度設計法，海岸工学論文集，第48巻，pp.911-915, 1998.
- 3) (財) 沿岸開発技術研究センター，数値波動水路の研究・開発，沿岸開発ライブラリー，No.12, 296p.
- 4) Coastal Engineering Research Center : Shore Protection Manual, Vol. II ,Department of Army Corps of Engineering, 1997.
- 5) 社団法人 全国海岸協会：人工リーフ設計の手引き，建設省河川局海岸課監修，94p, 1992. 4) 荒木進歩・出口一郎：捨石防波堤の断面系に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.531-535, 1997.
- 6) 荒木進歩・出口一郎(1997)：捨石防波堤の断面系に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.531-535.
- 7) 伊藤一教・東江隆夫・勝井秀博：DEM法とVOF法を用いた粒状体構造物の破壊シミュレーション，海岸工学論文集，第47巻，pp.746-750, 2000.
- 8) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248，24p, 1976.
- 9) 1)に同じ