

ケーブルで連結されたブロックによる 底質制御に関する研究

A STUDY ON CONTROL OF SEDIMENT TRANSPORT WITH CABLE-TIED BLOCKS

辻本剛三¹・成田由加里²・酒井大樹²・重松孝昌³・柿木哲哉⁴・宇野宏司⁴
Gozo TSUJIMOTO, Yukari NARITA, Taiki SAKAI, Takaki SHIGEMATSU, Tetsuya KAKINOKI
and Kohji UNO

¹フェロー会員 工博 神戸市立高専教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

²学生会員 神戸市立高専学生 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

³正会員 博(工) 大阪市立大学大学院環境都市工学 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

⁴正会員 博(工) 神戸市立高専准教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

The present paper is twofold: an experimental study to measure beach scarps, beach profile changes and suspended sediment concentration; and a numerical simulation to examine the hydraulic characteristics around the cable-tied blocks by employing the $k-\epsilon$ turbulence model.

The cable-tied blocks have reduced the formation of beach scarps due to decreasing the run-up height, and preventing the beach erosion under erosive wave actions. Also the values of suspended sediment concentration among them were much small, and so their stability was extremely high. The agreement between experimental data and the calculated values by the numerical simulation for the suspended sediment concentration is found to be good.

Key Words : Cable-tied block, beach scarps, suspended sediment concentration, beach profile change, $k-\epsilon$ turbulence model

1. はじめに

河川法の改正に伴い「多自然型川づくり」の観点から環境機能に優れている自然石礫で構築された構造物が望まれている。しかしながら自然の物で有るが故に破壊等の強度不足が指摘されている。そのために自然石を連結する工法（連結礫工）が山本ら¹⁾や前野ら²⁾により提案されている。連結礫工は個々の礫をチェーンやワイヤで連結した構造とすることで、流水中で移動しかけた礫の各々が引っ張り合い礫の流失が制御され、全体としては安定する構造になり、河川の中上流部などの流れの速い場所で使用されている。しかしながら、現場先行で使用されてきたため、安定性や破壊形態等の理論的な解明がなく明確な設計基準等が無い。山本らは連結されると単体よりも移動限界が低下するとの結論を得ているが、前野らは連結数が多くなるにつれて種々の破壊モードに対して安定性が増すとの結果を示している。Melville³⁾らも連結礫工に類似したCable-Tied Block Matの破壊限界について実験的に検討し、ブロックの幅と突起高さをを用いてその限界せん断力を示している。これらは河川のような一様流場を対

象としている。一方、海岸では自然石等は被覆石として使用されており、Hatipogluら⁴⁾は被覆石間からの底質の吸い出しに関する詳細な実験を行い、mobility number、底質と被覆石のスケール比、KC数の3つのパラメーターで吸い出し限界を示している。Dixenら⁵⁾大きな粗度で覆われた波動境界層での詳細な流動計測を行い、水粒子軌道長と粗度高さの関係から摩擦係数等の検討を行っている。このように粗度の大きな石等が単体として扱われている例は存在するが、連結礫工のようにケーブルで連結され構造物としての扱いは著者の知る限り存在し得ない。

図-1, 2は高潮位時の波により浜崖が形成され、その背後の防風林である松林の根本の洗掘等による倒壊や立ち枯れを保護するために、蒲団籠ブロックが設置されている状況である。植生帯に対しては基盤の底質との連続性を保つためにもストレスの掛り難い構造物での保全が望ましい。

本研究では、柔軟性に富み底面の形状に応じてその形状が変化可能な、図-3に示すようなコンクリートブロックを鋼線で連結させた構造物（以後、連結ブロックと称する）を汀線より陸側に設置する



図-1 浜崖部



図-2 浜崖部の蒲団籠

ことで浜崖の形成を防ぐ工法の可能性を検討した。図-3の模型ブロックは、底面縦横3cm、高さ2cm、上面縦横2.5cmの台形であり、これを19個鋼線で連結した。この連結ブロックは、設置が容易であり地形の回復に応じて撤去も可能であり、河川の連結礫工と同様に鋼線等で個々のブロックが連結されているために、波や流れによって流失等のリスクを軽減できる安定性が期待できる。



図-3 連結ブロック模型

2. 実験

(1) 浜崖実験

実験は神戸市立高専所有の長さ18m、幅0.6m、高さ0.8mの二次元造波水槽で行った。中央粒径0.46mmの底質で1/10勾配の斜面を形成し、岸側に防風林の植生帯に見立てた高さ20cm、奥行き12cm、勾配5/3の斜面を作成した。連結ブロックを浜崖下端に6列を基本として、表-1に示す条件の規則波を300波作用させた。表中の“連結なし”は、鋼線を用いずにブロックを単体で設置することを意味している。波作用後はレーザー距離計を用いて2cm間隔で浜崖前面から汀線近傍まで計測した。また、浜崖部は水路側面からトーレースして計測をした。

表-1 浜崖実験条件

Case	周期(sec)	水深(cm)	波高(cm)	ブロック列	連結
1-1	1.0	40	13.2	0	—
1-2				6	あり
1-3				6	なし
2-1	1.4	40	11.9	0	—
2-2				5	あり
2-3				6	あり
2-4				6	なし
3-1	2.0	42	11.9	0	—
3-2				6	あり
3-3				6	なし
3-4				7	あり
3-5				8	あり

(2) 海浜断面変形実験

浜崖実験と同じ底質で1/10勾配の移動床を作成し、連結ブロックを水路幅60cmに4列岸沖方向（20cm）に設置し、表-2に示す条件の不規則波を90分作用させた。表中の設置は初期汀線から連結ブロックの沖端までの距離を表している。

表-2 海浜変形実験条件

Case	周期(sec)	水深(cm)	波高(cm)	設置(cm)
堆積型	1.1	35	3.1	20
				30
侵食型	1.39	35	10.5	50
				75

(3) 浮遊砂濃度実験

前述の底質で5cm厚の平坦床を作成し、その上に連結ブロックを5列2cm間隔で設置し、水深35cm、波高11.4cm、周期1.01秒の規則波を作用させ、連結ブロックの上面を基準にして、連結ブロック間を上下1cm間隔で-2cm～5cmまでを濁度計を用いて浮遊砂濃度を30秒間計測した。なお、実験中は底面に砂連の形成はなかった。

3. 実験結果

(1) 浜崖

図-4にCase 2-1から2-4の結果を示す。堀

川らのCパラメータは7.6であり、中間型の波の条件である。ブロックが単体(FREE)であると浜崖の侵食距離は連結ブロックがない時と同程度であるが、おおむね連結ブロックを設置することにより低減されている。また、浜崖前面は崩落した底質のために堆積をしており、その堆積厚さは連結ブロックの有無によらないが連結ブロックの列数が少ないと、やや低くなっている。

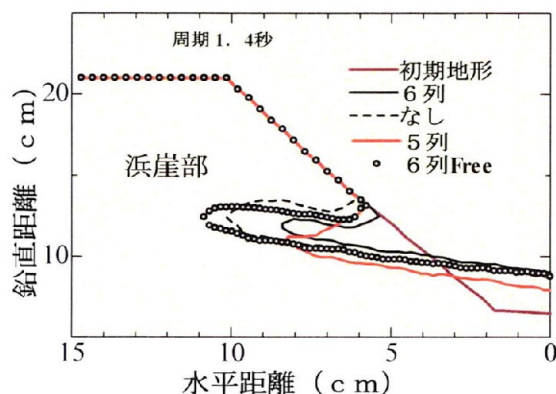


図-4 浜崖部の変形(Case2)

図-5に図-4の前浜部分の地形を示す。連結ブロックを設置すると碎波で形成されるトラフのスケールが小さくなり、沖側に堆積部が形成されている。その要因として遡上した水塊がブロック間で滞留することによるrun_down_flowが弱まったと考えられる。

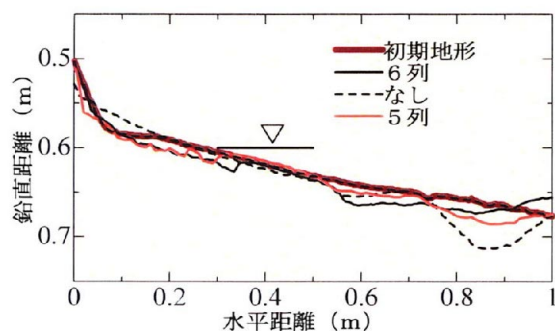


図-5 前浜部の変形(Case2)

図-6にCase 3-1から3-6の結果を示す。7列の場合浜崖の上部が波の作用により不安定となり崩壊し、連結ブロックなしと同程度の浜崖変形が見られる。しかしながら、ブロックの列を増すことにより浜崖の変形が低下している。

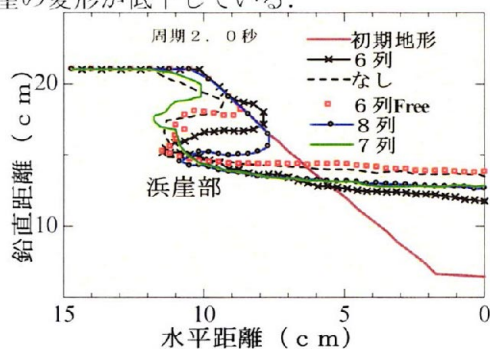


図-6 浜崖部の変形(Case3)

観測によれば波の遡上高さは6列の場合が最も大きく、8列の場合が最も小さくなった。そこで連結ブロック数と遡上高さと堆積高さの関係を図-7に示す。連結ブロック数の増加に伴い、抵抗体として流動の遡上を低下させ、また連結ブロック間の水塊の滞留効果により土砂の堆積を促進する。

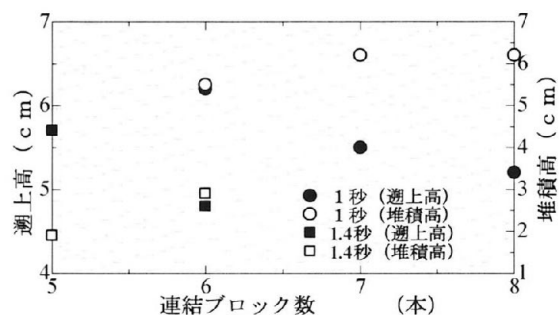


図-7 浜崖部の変形(Case3)

(2) 断面地形変化

浜崖近傍への連結ブロックの設置により汀線近傍の地形に変化が観測されたので浜崖を撤去し、一様勾配斜面に連結ブロックを設置した場合の結果を図-8に示す。ブロックの設置位置は初期汀線とブロック沖端との距離として、図中に数値で示す。

堆積型の場合は連結ブロックの有無や設置場所によらず、バームが形成され汀線の発達が見られる。若干、バーム頂が陸域に移動している。一方、侵食型の場合は、バーがより沖側に移動している。辻本ら⁶⁾は遡上域の透水係数が低下する(底面への浸透量の低下と同意)と、バーが沖側に移動する傾向があることを実験で示しており、連結ブロックの設置で水塊が滞留することで、遡上域の底面への浸透量が低下したと思われる。陸域では底質の堆積が見られ侵食されていない。ただ、連結ブロックが底質に覆われている個所もあるために、堆積部全てが底質ではないことに注意する必要がある。

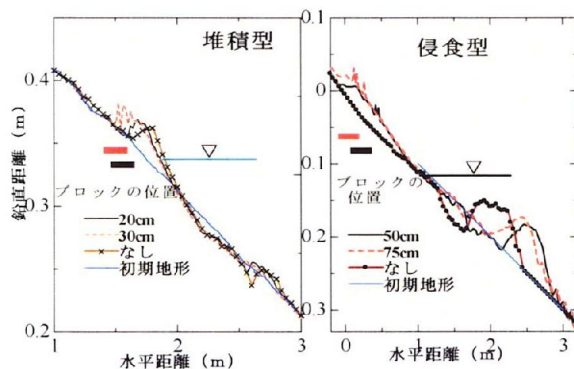


図-8 断面地形変化

(3) 連結ブロックの安定性

図-9はブロックの連結効果を検討するために図-8の斜面において連結ブロックを5列設置し、波高11.6cm、周期1.41秒、水深40cmの不規則波を作用さ

せた結果である。連結した場合は汀線から5列目の連結ブロックが移動しているのみであるが、岸沖方向に連結させることで連結ブロックの移動を制御することは可能である。一方、連結が無い場合は5、4列のブロックの移動や散乱が見られ、また1列目のブロックでも方向が変化し、転倒したものがいくつか見られた。ただし、影響を受ける列は汀線からの設置距離により異なる。



図-9 連結ブロックの安定性

(3) 浮遊砂濃度

図-10に連結ブロック上面から-2 cmと-1 cmに

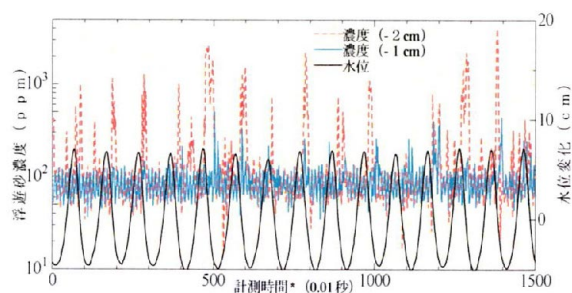


図-10 浮遊砂濃度と水位変化

おける浮遊砂濃度と水位の時系列変化を示す。濃度のピークが波の峰が通過する位相前後のみ見られ、他の位相では濃度値が極めて小さく、間欠的に底質が浮遊していることが伺える。また、-1 cmでは数100ppmm程度の濃度であり、浮遊砂が底面近傍に限られていることが解る。連結ブロックは約2 cm間隔で、2次元配列されており、目視観察においてもブロック間の流動は極めて小さく、底質の移動も表面の掃流砂が卓越していた。ただ、連結されたブロックの間隙から波に峰通過時、噴流のような流れが発生しており、この流れが図-10の濃度ピークをもたらしていると推察される。

3. 数値計算

(1) 概要

本連結ブロックは人工リーフのような水中に没して底質や流れの制御を行うのではなく、汀線より陸側に設置することを想定しているため、底質制御を理論的に扱うためには、①斜面上の遡上域の比較的水深の浅い水域の流れ・底質移動②ブロックの扱いの2点に関して検討する必要があることは言うまでもない。前者に関しては、例えば柿木・辻本⁷⁾や下園ら⁸⁾によって画像解析を用いた浮遊砂濃度の計測が行われているが、一般的な知見は充分ではない。後者に関しては、多数のブロックの存在した場合多孔質体としての扱いも考えられ、辻本ら⁹⁾は”macroscopic”乱流モデルによる透過性構造物の検討を行い、中條や重松ら¹⁰⁾は多孔質体の振動流の特性について画像解析を用いて検討しているが、連結ブロックに容易に適用することは困難である。そのためにここでは、連結ブロック周辺の流動等の基礎的な特性を把握するために、2次元場の水平床にブロックが設置された場を想定して、著者¹¹⁾が砂連上の浮遊砂流の解析に適用し、その適用性が確認されている $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた。

具体的には連結ブロックの数を複数個とし、その設置間隔を変化させた検討を行う。連結ブロックの存在は直接差分格子内に取り込み、連結ブロック面やその法線方向の速度や連結ブロック内の乱流諸量はゼロとして直接値を与えて、計算格子項を不活性化して扱う方法を用いた。本計算手法は陰解法のため計算格子や時間格子に依存することなく計算することが可能であるが、底面近傍は底質粒径程度に細かく鉛直方向は17分割、水平方向に1 cm間隔で41分割、時間格子は1周期を20分割して計算を行った。

(2) 計算結果

a) 流速ベクトル

図-11に浮遊砂濃度実験と同じ条件下での流速分布の結果を示す。図の位相は連結ブロック中央で(a)ゼロアップ(b)波の峰通過時の位相である。また、図中の□は連結ブロックを表している。(a)は流れの方向が沖向きから岸向きに反転した直後のゼロ

アップ位相であるにも関わらず、連結ブロック近傍及びその内部において、岸向き流れが発達している。連結ブロックの上面ではキャノピー流れに類似した波状の流動が形成されており、連結ブロック間への流動を誘起している。一方、(b)波の峰通過時には剥離に伴う渦の形成が砂漣上等で観測されるが、連結ブロック内では極めて遅い流れになっており、剥離に伴う渦の形成は見られない。

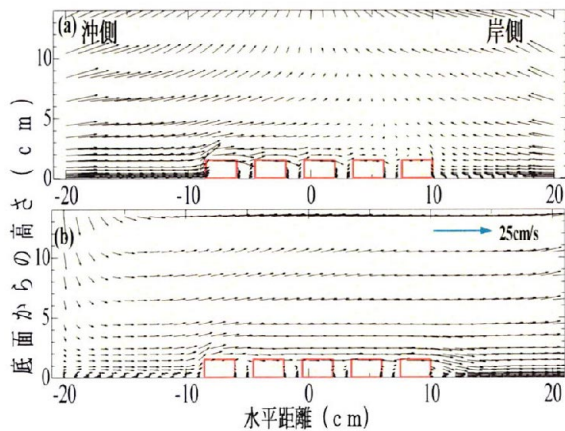


図-11 流速ベクトル (計算)

図-12に図-11(b)と同じ位相で連結ブロックの間隔を3cm程度に拡大させた時の流速ベクトルを示す。10cm～5cmの連結ブロック間に渦の形成が見られるが、全体的な流動には顕著な差は見られない

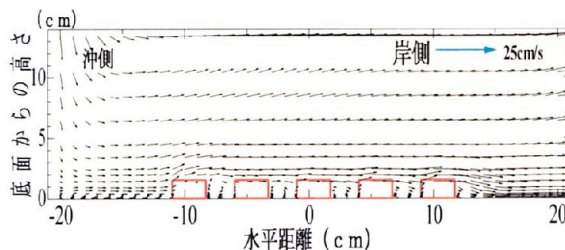


図-12 設置間隔変化時の流速ベクトル (計算)

図-13に1周期平均された流速ベクトルを示す。卓越した流れはなく後述する浮遊砂濃度の分布もほぼ一緒であることからフラックスとしての底質の移動は小さく、正味の移動量もほぼゼロとなり地形変

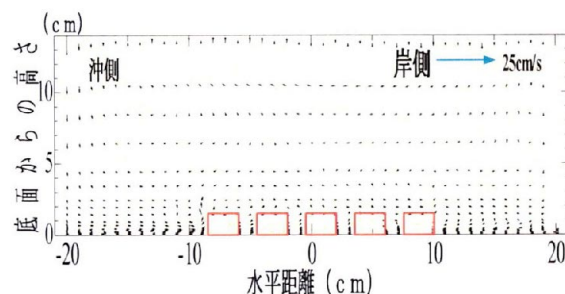


図-13 一周平均流速ベクトル (計算)

化に与える影響は小さい。

b) 乱れエネルギー

図-14は連結ブロックの中央において、波の峰通過とゼロダウンとの間位相における乱れエネルギーの分布である。(a)が連結ブロックの設置幅が3 cm、(b)が2 cmの場合である。連結ブロックの上面近傍で発生した乱れが連結ブロック間から内部に伝わっている様子が見受けられる。また、連結ブロック間の幅が大きくなるにつれて、乱れの強い領域が拡大している。

c) 浮遊砂濃度分布

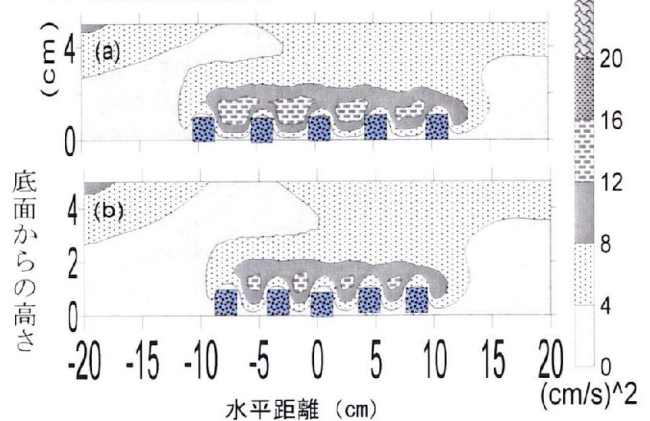


図-14 乱れエネルギーの空間分布

図-10から明らかなように連結ブロック間の浮遊砂濃度は波の峰通過辺りで瞬間的には高い値を示すが平均的には極めて小さい。図-15に図-10で計測された浮遊砂濃度の一周周期平均値の鉛直分布の計算と実験との比較を示す。実験値は底面から上方まで数ppm存在するが、計算では連結ブロック高さの半分程度の高さにおいてほぼゼロになっている。計算では完全な2次元を想定しているが、実験では連結ブロック間の間隙からの流動の影響があり、今後の検討が必要である。ただ、底面近傍に限れば実験と計算では近い値を示している。

図-16に一周周期平均された浮遊砂濃度の空間分布を示す。図中の(a)、(b)の区分は図-14と同じであ

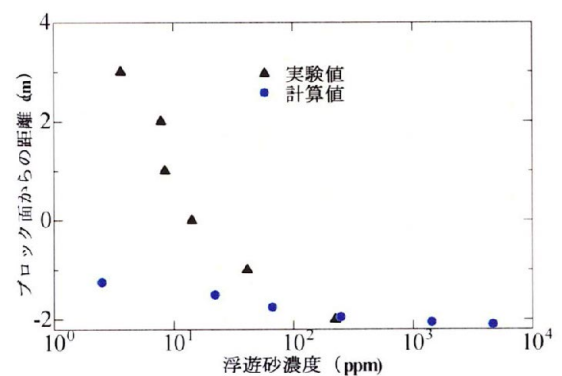


図-15 浮遊砂濃度の比較

る。連結ブロック外では数万ppm程度であるが、浮遊砂は底面から1cm程度の高さにのみ生じている。

一方、連結ブロック間の濃度は千ppm程度となり、連結ブロック外よりも1ケタ小さくなっている。計算では底面を平坦床として扱っており砂漣形状は扱っていない。実際の濃度計測は連結ブロック外において砂漣等の地形変化が生じ前に終えているために、底質の浮遊機構は連結ブロック間に生じる乱れ等の影響が大きい。しかしながら、連結ブロック内の流動や乱れは底質を浮遊させるまでには至らない。

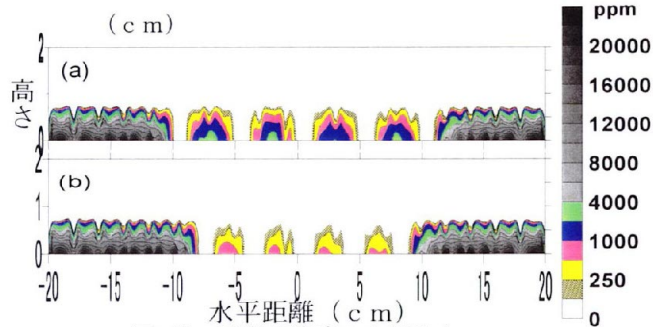


図-16 浮遊砂濃度の空間分布

4. まとめ

本研究では河川工事において使用されている連結礫工に類似したコンクリートブロックを鋼線で連結させた連結ブロックを用いた底質制御の検討を行った。海岸ではその適用例がないために、基礎的な実験と数値計算を行った結果以下のような結論を得た。

- ・連結ブロックは単体のブロックと比較して、安定性が極めて高く、移動や転倒が少なく沈下がほとんど見られない。また、鋼材で連結しているので任意の地形に柔軟に対応できる。
- ・侵食型の波作用下においても、連結ブロック間に砂を堆積させる効果が見られ、浜崖対策として有効である。
- ・その要因として、連結ブロックが抵抗体として波の遡上を低減させる効果と遡上した水塊を連結ブロック間で滞留させることによるdown-flowの低減効果である。
- ・連結ブロック周辺の浮遊砂濃度は極めて小さく、ブロック間からの底質の流失も少ない。
- ・ $k-\epsilon$ 乱流モデルで連結ブロックの浮遊砂濃度の推定を行った。

本研究では限られた実験条件であるため、今後の課題として、連結ブロックのサイズ、設置間隔、設

置列数を変化させた検討が必要である。また、ブロックと底質とのスケール比が底質制御には重要なパラメーターであるため、粒径の小さい底質を用いた浮遊砂濃度計測等が必要である。

参考文献

- 1) 山本太郎, 長谷川和義, 浅利修一: 複数の礫が連結されることによる流失限界の向上効果と掃流力評価について, 土木学会論文集, Vol. 62, No. 1, pp. 53-64, 2006.
- 2) 前野詩朗, 藤原実咲, 富田晃生, 山村明, 倅熊公子: 連結石礫の流体力評価に関する研究, 水工学論文集, 第51巻, pp.101-105, 2007.
- 3) B. Melville, R. van Ballegooy and S. van Ballegooy: Flow-induced failure of cable-tied block, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 3, pp. 324-327, 2006.
- 4) Hatipoglu, F., M. Diken, B. M. Sumer and J. Fredsoe: Suction removal of sediment from between armor blocks II: Wavys, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 10, pp. 1405-1420, 2008.
- 5) Diken, M., F. Hatipoglu, B. M. Sumer and J. Fredsoe: Wave boundary layer over a stone-covered bed, *Coastal Engineering*, Vol. 55, pp. 1-20, 2008.
- 6) 辻本剛三, 細山田得三, 柿木哲哉, 宇野宏司: 不規則波によるフィルター層を有する海浜断面の可逆性から見た安全性について, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 746-750, 2008.
- 7) 柿木哲哉, 辻本剛三: 波打ち帯における底面露出時を含めた漂砂量の画像計測, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 491-495, 2007.
- 8) 下園武範, 佐々木淳之, 岡安章夫, 松林由里子: 光遮断方式による高濃度浮遊砂の画像計測, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1436-1440, 2008.
- 9) 辻本剛三, 柿木哲哉, 浜浦雄太, 重松孝昌, 日下部重幸: Macroscopic乱流モデルを用いた透過性楕物内外の底質の移動に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 456-460, 2005.
- 10) 中條壯太, 重松孝昌, 坂下直也, 辻本剛三, 竹原幸生: 振動流特性が多孔質体誘起乱流に及ぼす影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 841-845, 2008.
- 11) Tsujimoto G., N. Hayakawa, M. Ichiyama, Y. Fukushima and Y. Nakamura: Suspended sediment concentration and sediment transport mechanism over sand rippled bed using the turbulence model, *C.E.J.*, Vol. 34, No. 2, pp. 177-190, 1991.