

長尺化被覆ブロックの耐波安定性について

吉田明徳*・喜多寛史**・Yan Shuguang***・谷山正樹****

1. ま え が き

常時水面下にある景観を損なわず、閉鎖水域を作ることがなく環境面で好ましい潜堤は、従来よりもまして多くの海域で、かつより大水深の海域において用いられるようになるものと考えられる。潜堤の構造は、潜堤本体を消波ブロックで構築する型式と捨石の堤体マウンドを被覆ブロックで覆う形式とに大別されるが、本研究は後者で用いられる被覆ブロックに関し、より耐波安定性が高くかつ施工性の良い被覆ブロックの開発を目的として行ったものである。

潜堤を対象とした被覆ブロック等の耐波安定性に関連してはすでに多くの研究がなされており、コンクリート製被覆ブロックの耐波安定性を水理実験で調べた浅川ら(1992)、中山ら(1993)の研究、ブロックに作用する流体力を測定し被災機構を議論した岡本・河野(1993)、田中ら(1994)の研究、球体および形状の異なる碎石を対象に力学モデルに基づく所要重量算定を試みた水谷らの一連の研究(例えば1994)、碎石被覆材の耐波安定性についての渡辺ら(1993)の研究、緩傾斜堤に用いた被覆ブロックの安定性についての斎藤ら(1998)の研究、ブロック形状による被災機構の差異を検討した福島ら(1999)の研究、潜堤背後からの還流がブロックの安定性に与える影響を検討した山下ら(1995)の研究などがある。

ただし、被覆ブロックに関しては無筋コンクリートの型枠製作という前提からか、平面形状がほぼ正方形の方形ブロックに限られており、方形形状を変えることによる耐波安定性の向上についての検討はなされていない。著者らは方形ブロックの波による動揺の様子より、ブロックの縦横比を変えて波の入射方向にブロックを長尺化することで安定性を向上させ得ると考え、その具体的な形状として、近年注目されているリサイクルタイヤを用いた長尺化ブロックを提案した(図-2)。本論文は、水槽実験をおこなって、新しく提案した長尺化ブロックの耐波安定性を従来の方形ブロックの安定性と比較検討

したものである。

2. 従来の被覆ブロックの問題点とリサイクルタイヤを用いた長尺化ブロック

(1) 従来の被覆ブロックの問題点

著者らは従来の被覆ブロックの問題点として次のような点を考えている。(a) 形状・寸法および重量が異なるブロック毎に専用の鋼製型枠を大量に製作・保管しておく必要があり、型枠の製作および維持・保管に手間がかかる。(b) 型枠組立て、コンクリート打設、養生、脱型の工程を繰返して被覆ブロックを製作するため工期が長くなる。(c) 無筋コンクリートの型枠製作という前提からか、ブロックの平面形状はほぼ方形に限られていて、ブロックの形状に波の進行方向が考慮されていない。

(2) 長尺化被覆ブロックの構造と特徴

本研究で対象とした長尺化被覆ブロックの構造の概略を図-2、図-3に示す。複数のタイヤを横積みした柱状タイヤ型枠ユニットを鉄筋を用いて長尺状に一体化したもので、柱状型枠ユニットは内部に補強鉄筋を設けコンクリートを充填して形成し、これらのユニットを一体化する鉄筋は、横積みされたタイヤの間を通して格子状に配設される。このようにして製作する長尺化被覆ブロックの施工面および環境面での特徴として以下のような点があげられる。

(a) タイヤでコンクリートを被覆しているため、ブロックの破損や消耗の程度が小さい。(b) リサイクルタイヤを捨て型枠として打設するため、型枠の組立て・脱型作業の必要がない。(c) ブロックの寸法諸元をタイヤの段積み数および配列で容易に調整ができる。(d) ブロックの段積みと連結鉄筋によるブロックの製作は、熟練工を必要とせず、小型の重機を用いて簡単な作業でおこなえる。(e) ブロック1個あたりの被覆面積が既存ブロックに比べて大きく、ブロックの据え付け数量が減少し工期短縮が図れる。(f) 今後も無数に生じると考えられる廃タイヤを積極的に利用するもので、廃タイヤの処理問題にも寄与し、資源のリサイクル活用や環境保全の面からも好ましい。

* 正 会 員 工 博 九州大学助教授 大学院工学研究院環境都市部門

** 正 会 員 (株)東京久栄環境技術部

*** 学生会員 工 修 九州大学工学府博士課程

**** 正 会 員 工 修 共生機構(株)

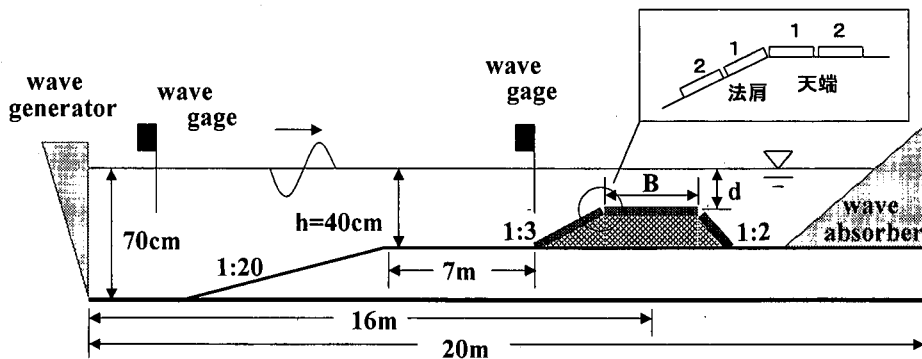


図-1 実験水路と潜堤模型

表-1 実験条件

天端水深 d (cm)		0, 1, 2, 3, 4, 5
設置水深 h (cm)		40
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)		5, 6, ..., 18
有義周期 $T_{1/3}$ (s)		1.84, 2.24
方形ブロック	外寸 (cm)	4.2×4.2×2.4
	重量 (g)	54
	比重 (g/cm^3)	2.3
長尺化ブロック	外寸 (cm)	4.1×12.3×2.6
	重量 (g)	1771
	比重 (g/cm^3)	1.75
天端幅 B (cm)		76 (方形), 74 (長尺化)
法面勾配		1:3 (前面), 1:2 (後面)

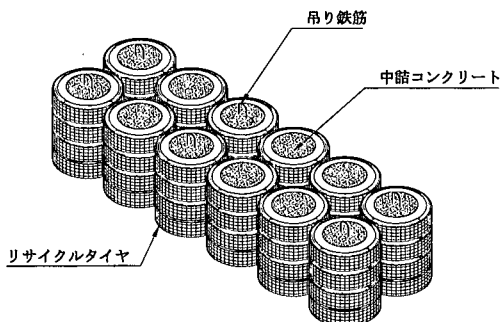


図-2 リサイクルタイヤを用いた長尺化被覆ブロック

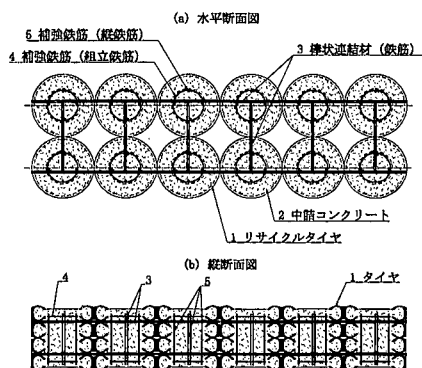


図-3 長尺化被覆ブロックの構造

3. 実験装置と実験の方法

実験は、図-1 に示す底面形状で反射吸収式造波装置を有する2次元造波水路に、砂利(透過率46%)を用いて、前面勾配1:3、後面勾配1:2の捨石マウンドを作り、その法面と天端を、方形ブロック(天端幅 $B=76$ cm)および長尺化ブロック ($B=74$ cm)で被覆して堤体模型を作製した。被覆ブロック模型は、実物のほぼ1/50を想定し、外形寸法 $4.2\text{ cm} \times 4.2\text{ cm} \times 2.4\text{ cm}$ 、重量 54 g (比

重 $2.3\text{ g}/\text{cm}^3$)の方形ブロックと、縦横比をほぼ3:1に取った、外形寸法 $4.1\text{ cm} \times 12.3\text{ cm} \times 2.6\text{ cm}$ 、重量 171 g (比重 $1.75\text{ g}/\text{cm}^3$)の長尺化ブロックを用いた。この長尺化ブロックの重量は、5段積みにしたタイヤの最下段にはコンクリートを充填しないとした場合の値である。

実験に用いた入射波は、 $T_{1/3}=2.24$ 秒 ($k_{1/3}h=0.60$: $k_{1/3}$ は有義波の波数)と、 1.84 秒 ($k_{1/3}h=0.75$) の2通りの有義周期を有する、Bretschneider—光易型スペクトルの不規則波で、有義波高 5 cm から 18 cm まで変化させた。堤体を設置した本実験に先立ち、あらかじめ堤体がない状態での予備実験をおこなって堤体の前面法先位置における水面変動を測定し有義波高を求め、本実験ではこの実測波高を入射波の有義波高として用いた。使用した水路の同様傾斜部分の勾配が1:20と幾分急である為、有義波高が大きくなると勾配上端近傍で碎波を生じようになり、必ずしも目標のスペクトル形状を十分近似できてはいないが、有義波高が 15 cm 程度まではほぼBretschneider—光易型スペクトルが表現できている。

水深は $h=40\text{ cm}$ に固定し、捨石マウンドの高さを変えることによって、天端水深 d を 0 cm から 5 cm まで1

cm きざみで変化させた。当初、水深 $h=25\text{ cm}\sim 30\text{ cm}$ での実験を想定していたが、長尺化ブロックが予想以上に安定で飛散させ得る波高が起こせなかったため、 $h=40\text{ cm}$ に設定しておこなった。各天端水深毎に有義波高 $H_{1/3}$ をそれぞれ堤体が波によって動揺しない波高から 1 cm ずつ大きくし、被覆ブロックが飛散するまで各波高ごとにブロックの動揺と飛散の状況を観察し、同時にビデオで撮影した。各波高ごとにまず 500 秒間波を作用させ、ブロックに有意の動揺が見られる場合には、さらに 500 秒間引き続き作用させた。 500 秒の波作用ごとにいったん造波を打ち切りブロックの被災状況を観測して記録し同時に写真撮影をおこなった。

(1) ブロックの配置

実験をおこなった各ケースについて、平面的なブロックの設置状況を図-4 に示す。方形ブロックに関しては図-4(d) に示す通常の整列配置のみで、長尺ブロックに関しては、まず、ブロックの縦方向を入射波の方向にとり、タイヤの突起部が互いに接するようにブロックを配置した場合(整列設置: 図-4(a))、次いで、長尺化の効果が無い状態を想定し、入射波方向に対して長尺化ブロックを垂直に配置した場合(横向き設置: 図-4(c))、最後に、タイヤの半円形上の凹凸部を噛み合わせた状態で設置した場合(噛合設置: 図-4(b))について、それぞれ安定性を検討した。

(2) データ解析の方法

設計波高に対して安定なブロック重量を算定するために用いられる下記の Brebner—Donnelly の式より、実験で測定した潜堤前面の法先位置での有義波高 $H_{1/3}$ に対する安定数 N_s を算定し、入射波の有義波高 $H_{1/3}$ に対する天端水深 d の比を d/H で表して横軸にとり、縦軸に安定数 N_s を後述するブロックの動揺の状況を示す記号とともにプロットした。

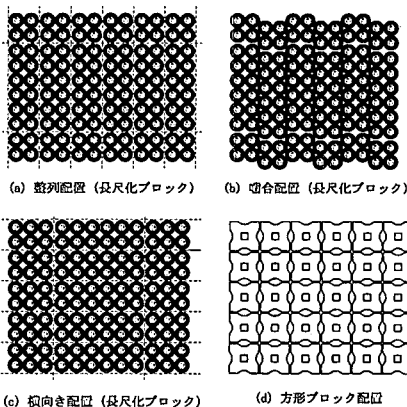


図-4 ブロックの配置

$$W = \frac{w_r H_{1/3}^3}{N_s^3 (w_r/w_0 - 1)^3}$$

上式で、 W : ブロック重量、 w_r : ブロックの単位体積重量、 w_0 : 水の単位体積重量、 $H_{1/3}$: 堤体法先位置での進行波の有義波高。

(3) ブロックの移動状況

波作用下のブロックの状況を、安定、動揺(小、中、大)、飛散に分類した。目視で確認できる動きがブロックに全く認められない場合を「安定」、設置面に沿うのブロックの前後運動やブロックの後端を軸に前方が浮き上がるロッキング運動など何らかの動きが多少とも認められる場合を「動揺」、ブロックがその場で横転あるいは一回転した場合や、ブロックが初期の設置位置から抜け出した場合を「飛散」と分類した。なお、動揺の(小、中、大)は目視による動揺の大きさを感覚的に3分割して示したもので、厳密な分類ではない。

4. 実験結果と考察

(1) 方形ブロックの安定性

方形ブロックについての N_s 値とブロックの動揺状況の分布を図-5 ($k_{1/3}h=0.6$) と図-6 ($k_{1/3}h=0.75$) に示している。有義周期が異なる入射波より得られた N_s 値の分布はほぼ同じで、入射波の有義周期による差異はほとんど見られない。図中の実線はブロックの動揺の状況をもとにブロックが多少なりとも動揺を始める限界を描いたもので(安定限界曲線)、同様に点線はブロックに飛散が生じる限界(飛散限界曲線)を描いたものである。安定限界曲線はほぼ 2.0 程度をとっている。

波作用後のブロックの状況には、有義波高が大きくなるにつれて天端1のブロックと法肩1のブロックの間隔が広がっていくのが天端水深の異なる全ての実験ケースについて見られた。これは法面上のブロックが下方に幾分滑り落ちたこともあるが、天端のブロックに碎波が衝撃的に作用する際にブロックが岸側に押されたため、従来の研究でも指摘されているように動揺を始めるのはほとんどのケースで天端1か、法肩1のブロック

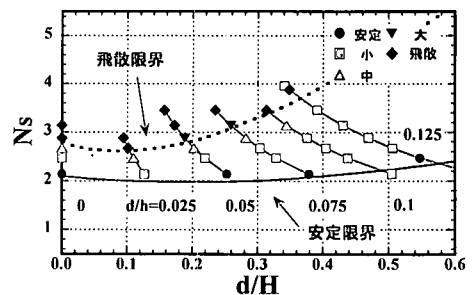
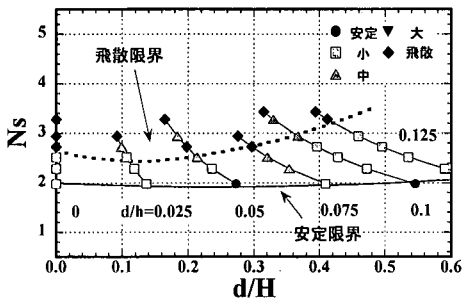
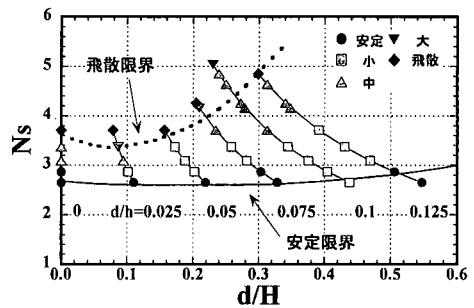


図-5 方形ブロック、 $k_{1/3}h=0.60$

図-6 方形ブロック, $k_{1/3}h=0.75$ 図-7 長尺化ブロック (整列配置), $k_{1/3}h=0.6$

からであった。

(2) 長尺化ブロックの安定性

i) 整列配置

整列配置の結果を図-7 ($k_{1/3}h=0.6$)と図-8 ($k_{1/3}h=0.75$)に示す。両者を比較すると有義周期が異なっても安定限界曲線および飛散限界曲線の N_s 値の分布はほぼ同じで、入射波の周期による差異は方形ブロックと同様にほとんどない。

安定限界について、図-5および図-6の方形ブロックと比べると、方形ブロックでは N_s 値はほぼ2程度、一方長尺化ブロックの N_s 値はほぼ2.5程度である。Brebner—Donnellyの式よりわかるように、所要重量 W は、 N_s 値の3乗に反比例することから、与えられた波高 $H_{1/3}$ に対して、長尺化ブロックの所要重量を $W_{長}$ 、方形ブロックの所要重量を $W_{方}$ で表すとその比は次式で与えられ、

$$\frac{W_{長}}{W_{方}} = \left[\frac{w_r}{N_s^3(w_r/w_0 - 1)^3} \right]_{長} \cdot \left[\frac{N_s^3(w_r/w_0 - 1)^3}{w_r} \right]_{方}$$

先述のブロックの比重と上述の N_s 値を用いて計算すると、長尺化ブロックの所要重量は方形ブロックのほぼ2倍の重量となるが、長尺化ブロックが方形ブロックのおよそ3倍の面積を被覆できることを考えると、被覆面積当たりの重量は長尺化ブロックは方形ブロックの7割弱で済むことになる。しかも、実験で用いた長尺化ブロックモデルの比重 1.75 g/cm^3 は、5段積みにしたタイヤの最下段にはコンクリートを充填しないと想定したもので、コンクリートが充填されている場合には比重は 2.1 g/cm^3 となり、ブロック形状は同じであるから、実際の安定性はさらに向上すると想定される。一方、飛散限界曲線についても長尺化ブロックの N_s 値は方形ブロックの N_s 値よりも大きく、しかも、天端水深が大きくなると方形ブロックに比べ格段と大きくなる。個々のブロックの被災が直接堤体全体の被災には結びつかない消波ブロックの場合には被災率の概念が用いられるが、被覆ブロックでは1個の被災が急激に被災の増大を拡大させる傾向が見られ、斎藤ら(1998)も指摘しているように、安定限界に近い N_s 値での設計が必要であると考えられる。

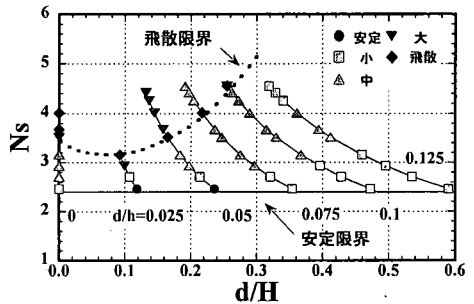
図-8 長尺化ブロック (整列配置), $k_{1/3}h=0.75$

図-7および図-8の長尺化ブロックに見られる飛散限界曲線の特性は、想定外の大きさの波浪が来襲した場合に、長尺化ブロックは方形ブロックに比べて「飛散」しにくく、格段に粘り強いことを示している。

ii) 横向き整列配置

現実の海域では、波が斜め入射をする場合があり、入射角が大きくなるほど長尺化の効果は減少し、安定性が減少すると考えられる。斜め入射の安定性については、平面実験によらねばならないが、最も長尺化の効果が弱い状態を想定して、長尺化ブロックを入射波の波向きに垂直に設置した場合の実験をおこなった。その結果を $k_{1/3}h=0.6$ と $k_{1/3}h=0.75$ の場合を合わせて図-9に示す。横向きに設置した場合は長尺化の効果は生じず、ブロックの単位体積重量も小さいため安定限界曲線の安定数は減少し、 $N_s=1.4$ 程度となる。ただし、ブロックの飛散限界を見ると横置きの場合の飛散限界は方形ブロックの場合の飛散限界とほぼ同じであり、後述するブロック凹凸部の噛合せ配置による安定性の向上なども考えると、斜め入射波に対しても問題とはならないと推測できる。

iii) 噛合せ配置

リサイクルタイヤを用いた長尺化ブロックでは、ブロックの凹凸部が互いに噛合うことで耐波安定性が増すことが考えられる。そこで、ブロックを噛合せて設置した場合の安定性を調べた結果を図-10に示している。整

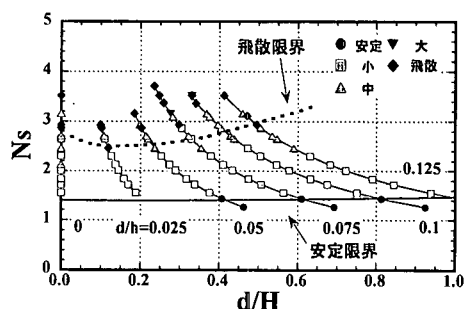


図-9 長尺化ブロック(横向きに整列配置), $k_{1/3}h=0.6, 0.75$

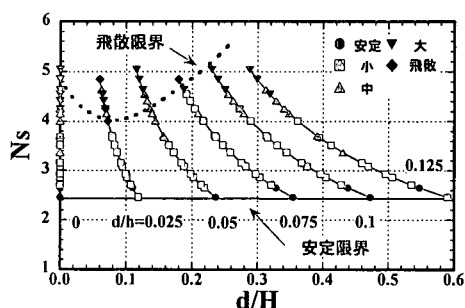


図-10 長尺化ブロック(噛み合い整列配置), $k_{1/3}h=0.6, 0.75$

列配置した図-7, 8と安定限界曲線は変わらないが、飛散限界曲線は、著しく大きくなり、噛み合わせることでブロックが飛散しにくくなっているのがわかる。噛み合わせて設置した場合もブロックに作用する揚力は整列配置の場合と大きな差異は生じないと考えられ、このため安定限界がほぼ同じになるものと考えられる。飛散限界が大きくなるのは、噛み合うことでロッキングに必要なブロック間のスペースがなくなり、結果として特定のブロックがロッキングにより飛散するのを両隣のブロックが支え防いでいることによると思われる。

5. あとがき

従来の方形ブロックに比べて施工性が良く耐波安定性の高い被覆ブロックとしてリサイクルタイヤを用いた長尺化被覆ブロックを提案し、その耐波安定性実験を行った結果、従来の方形ブロックに比べて長尺化ブロックが優れた耐波安定性を有することを確認した。特に、

(1) 方形ブロックと長尺ブロックの差が小さい安定限界を N_s 値に取って比較しても、方形ブロックの N_s 値は2程度、一方長尺化ブロックの N_s 値は2.5程度で、Brenner-Donnellyの式より算定される長尺化ブロックの重

量は方形ブロックの重量のほぼ2倍となる。しかし長尺化ブロックが方形ブロックのおよそ3倍の面積を被覆できることから、被覆面積当たりの重量は方形ブロックの7割弱で済む。しかも、これは本実験で用いた長尺化ブロックの比重 1.75 g/cm^3 で算定した場合で、実際には長尺化ブロックの重量は方形ブロックに比べさらに小さくて済むと考えられる。

(2) 飛散限界の N_s 値は、長尺化ブロックの方が方形ブロックよりも大きく、しかも、天端水深が大きくなると方形ブロックに比べ急激に大きくなる。これは方形ブロックに比べ長尺化ブロックの方が飛散しにくく格段に粘り強いことを示すものである。

(3) 噛み合わせの場合、安定限界曲線は整列配置の場合と変わらないものの、飛散限界曲線は整列配置の場合よりも著しく大きくなる。噛み合わせることで特定のブロックがロッキングにより飛散するのを両隣のブロックが支え防いでいることによる。

本文で示した長尺化ブロックが示す高い耐波安定性についての力学的な検討までは今回の研究では行っており、今後の課題である。

本実験を行うに当たっては、当時大学院修士課程2年の越智宏充君(五洋建設)の助力を得た。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 浅川 勉・佐藤宏和・ロノ町・野口正昭 (1992): 人工リーフ被覆材の安定性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 656-660.
- 岡本俊策・河野茂樹 (1993): 人工リーフ被覆材の被害発生機構についての実験的考察, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 821-825.
- 斎藤正文・小林一光・錦織和紀郎 (1998): 緩傾斜堤に用いる被覆ブロックの安定性に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 811-815.
- 田中茂信・岩崎福久・茂木祐治 (1994): 人工リーフ被覆材の飛散機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 786-790.
- 中山哲蔵 (1993): 人工リーフの物理特性及び被覆材の安定性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 816-820.
- 福島雅紀・山本幸次・佐藤慎司・山本吉道 (1999): 低天端離岸堤の被覆ブロック被災機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 896-900.
- 水谷法美・岩田好一朗・Teofilo Monge Rufin, Jr.・戸塚宗洋・倉田克彦 (1994): 幅広潜堤の被覆捨石の安定重量の算定法に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 781-785.
- 山下俊彦・平野明徳・小野敏行・佐伯 浩 (1995): 人工リーフの物理特性とブロックの安定への還流の効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 766-770.
- 渡辺増美・河島宏治・佐藤公己・喜岡 涉 (1993): 移動限界波高および移動限界流速による潜堤被覆材の安定性評価, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 786-790.