

消波ブロック被覆工の法先洗掘と波浪条件に関する研究

榊 山 勉*・鹿 島 遼 **

1. 緒 論

発電所の立地拡大を目的に人工島の防波護岸の耐波・防波機能に関する研究が進められてきた(鹿島ら, 1993; 榊山ら, 1994). 岩盤上に防波護岸が設置されることを前提に波浪に対する消波ブロック被覆工の安定性を検討し, その設計法がとりまとめられた(土木学会, 1996). 人工島式立地原子力発電所建屋は, 在来立地と同じく堅固な岩盤上に建設されるが, 防波護岸は海底砂面上に建設される可能性が高いので, 法先洗掘による消波工の被災が懸念される. このような問題に関しては, すでに洗掘対策を目的に防波堤法先洗掘実験が現地での種々の対策工を対象に行われている(運輸省第四港湾建設局, 1990). また, 種々の対策工についてまとめられている(土木学会, 1994). さらに, 現地調査も行われ法先洗掘によるものと思われる消波工の沈下が報告され(五明ら, 1995; 五明ら, 1997), 液状化との関連性が示唆されている. しかし, 外力である波動場と漂砂機構との関連性は明らかにされていない. そこで本研究では, 上記の問題に対して 2 種類の縮尺の下で移動床実験を行い, 外力である波動場と法先近傍の砂面変形について調べた. さらに, 対策工に関する実験を行うとともに防波機能の観点から局所的な海底地形変化の越波流量に及ぼす影響を調べた.

2. 実験方法と実験条件

水理実験は長さ 205 m, 深さ 6 m, 幅 3.4 m と長さ 51 m, 深さ 1.2 m, 幅 0.9 m の 2 種類の 2 次元造波水路を用いて, 図-1 に示す消波ブロック被覆のケーソン護岸を対象に行った.

消波ブロックは現地換算重量で $W=80\text{ tf}$ である. ケーソン背後には裏込石と埋立土で埋立地を作製した. 両者の間には防砂シートを張り埋立土の流出を防いだ. マウンド内の透過波による防砂シートに作用する圧力を抜くために模型では裏込石を埋立土の表層まで延長した. 海底勾配は 1/40 である. 実験ではケーソンの沖側前面から

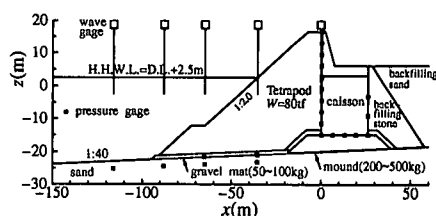


図-1 実験に用いた防波護岸断面形状(現地換算値)

沖方向へ現地換算値で約 450 m の区間を砂地盤とした.

実験での測定項目は, 砂地盤の地形と消波工断面形状, 消波工近傍の重複波の波高分布ならびに流速の水平・鉛直分布, ケーソンに作用する波圧分布(16 台), 砂地盤中の間隙水圧(6 台), 越波流量と反射率等である. 波高や流速の空間的な分布は, 1 回の波作用が 250 波の繰り返し毎に測定器を移動させて求めた. したがって, 地形変化が顕著な場合にはその影響を含む結果となる.

模型縮尺は 1/60 と 1/22.7 で, 使用した砂を除き, 形状や測定器の位置は相似である. 1/60 実験では中央粒径 $d_{50}=0.2\text{ mm}$ と 0.16 mm の 2 種類の砂を用い, 1/22.7 実験では $d_{50}=0.2\text{ mm}$ の砂のみとし, 実験スケール効果の検討材料とする. さらに, 1/60 実験では $d_{50}=0.16\text{ mm}$ の砂に対して対策工に関する実験を行った. 地形と護岸の断面測定は 4 測線について行い(測深ピッチは 1/60 実験で 0.5 cm, 1/22.7 実験で 1 cm), 平均値を採用する. 測深は車輪式測深器で行い, 砂地盤と消波工の両者の断面形状の連続測定が可能である.

対象とする基本設計波は 100 年確率波で有義波高 $H_{1/3}=10.3\text{ m}$, 有義波周期 $T_{1/3}=16\text{ s}$ を想定している. また, 設計波を越える極めて稀な波浪に対して機能維持が確保できる範囲内の消波工の変形を許容する設計概念に適用する波浪条件として $H_{1/3}=12.8\text{ m}$, $T_{1/3}=16\text{ s}$ (耐力検討波と呼ぶ)の実験と規則波 ($H=15.5\text{ m}$, $T=16\text{ s}$) の実験を行った. 波浪条件を表-1 に示す. 地形変化の測定のための波作用時間を表-2 に示す. 高波浪による短期間の局所洗掘に対する消波ブロックの安定性の検討とともに常時波浪による長期にわたる地形変化に対しては, 上記波浪を長時間作用させ時間を加速させた結果で評価

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所

表-1 実験における波浪条件

模型縮尺 λ	1		1/22.7		1/60	
波浪レベル	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$
基本設計波	10.3 m	16 s	0.452 m	3.36 s	0.172 m	2.07 s
耐力検討波	12.8 m	16 s	0.563 m	3.36 s	0.213 m	2.07 s

表-2 波作用時間 $t/T_{1/3}$ (現地換算作用時間)

粒径 d_{50}	$\lambda=1/22.7$		$\lambda=1/60$	
	基本設計波	耐力検討波	基本設計波	耐力検討波
0.20 mm	6000 (26.7)	12000 (53.5)	24000 (106.7)	24000 (106.7)
0.16 mm	— —	— —	72000 (320)	3000 (13.3)

表-3 法先洗掘と対策工の実験条件と作用時間 t/T

現地換算波高 $H=15.6$ m 現地換算周期 $T=16$ s	$\lambda=1/60$	
	基本設計波	耐力検討波
粒径 d_{50} 0.16 mm	12000 (53.3)	12000 (53.3)

することにした。規則波を用いて行った洗掘対策工の波浪条件と波作用時間を表-3に示した。この実験での規則波の波高が不規則波実験に比べて大きかったため、不規則波と等価なエネルギーを有する規則波について、数値計算モデルを用いて平均流速分布を比較した(桝山・香山, 1997)。

3. 実験結果

室内実験で頻度高く使用されている中央粒径 $d_{50}=0.2$ mm の砂を用いて洗掘実験を行った。模型縮尺 $\lambda=1/60$ の室内実験結果と $\lambda=1/22.7$ の大型模型実験結果をあわせて図-2に示す。図の結果は耐力検討波 $H=12.8$ m を作用させたもので、作用波数は $t/T=12000$ (実時間換算で53.3時間)である。この作用時間は100年確率波を越える高波浪の継続時間を遙かに越えて作用させたことになる。1/60実験では消波工法先で堆積が生じ、1/22.7実験では砂漣よりも大きなスケールで地形変化が生じた。しかし、2種類の縮尺の実験結果とも消波護岸の法先で洗掘は生じなかった。

図は省略するが、基本設計波による結果は耐力検討波

よりも地形変化量は少なく、洗掘の傾向もみられなかった。1/60実験では、基本設計波と耐力検討波ともに作用時間 $t/T=24000$ (実時間換算106.7時間)まで波を作用させたが、法先洗掘とそれに伴う消波護岸の変形は認められなかった。ただし、今回の同じ粒径の砂を使用した異なる模型縮尺実験では、1/60実験の小スケールの実験のほうが2次元的な砂漣の発生が顕著であった。

1/22.7実験での耐力検討波の実験終了後、消波ブロックを撤去する際にグラベルマットの変形形状を観察した。法先の小段先端の消波ブロックの沈下はみられなかったが、小段近傍の被覆層内で消波ブロックのグラベルマット内への沈下が観察された。この沈下量は消波ブロック高さの約1/3程度で、現地換算値で約1.5mに相当する。ただし、小段より岸側の消波ブロック被覆層が厚い場所では沈下量が小さくなり、消波工本体への影響はほとんどなかった。以上より、設計波以上の高波浪の一時化の継続時間のもとで法先洗掘による消波工の被災は認められなかった。

次に、 $d_{50}=0.16$ mm の砂を用いた結果を示す。基本設計波に対しては長期にわたる変化を観察するために波作用時間を $t/T=72000$ (実時間換算320時間)とした。基本設計波は100年確率波を設定しているため、このような長時間の波の継続は非現実的であるが現象を加速して観察するために行った。耐力検討波に対しては一時化を対象に $t/T=3000$ (同13.3時間)に留めた。

図-3に示すように、基本設計波の作用のもとでは、砂は沖から岸方向へと運ばれ長時間にわたって波を作用させたことともあり消波護岸の法先に著しく堆積した。

基本設計波と耐力検討波の作用のもとで砂面が侵食された範囲の水深は模型値で0.6mから0.5mであり、現地換算値では水深36mから30mに相当する。砂の移動形態は掃流とともに浮遊により運ばれることが観察された。特に浮遊砂は消波工内部まで輸送されマウンド内に著しく堆積した。この結果、マウンド内の透過波が減少しケーソン背後の波圧計の出力が著しく低下した。

以上のように基本設計波、耐力検討波を作用させた結

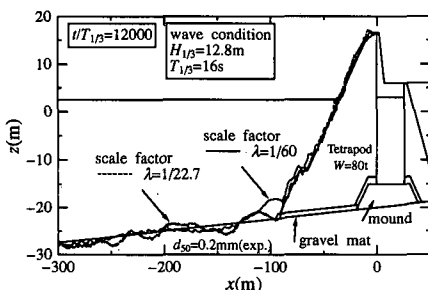


図-2 地形変化の1/22.7実験と1/60実験の比較

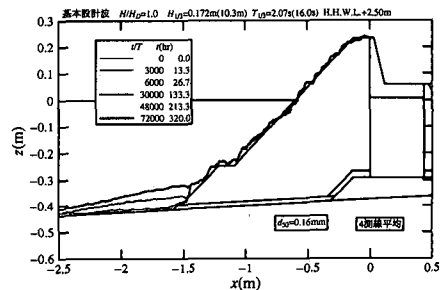


図-3 不規則波による法先地形変化—堆積—

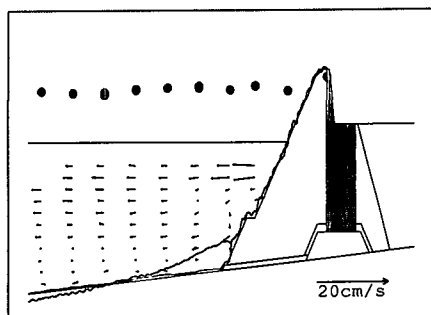


図-4 不規則波による法先堆積時の平均流速分布 (1/60 実験)

果, 中央粒径 $d_{50}=0.20$ mm の結果と同様に消波工法先で洗掘は生じることなく堆積の形態をとった。

五明ら (1995, 1997) は現地調査を行い消波工法先の洗掘による消波ブロックの沈下の被害を報告している。水深は最大で 19.4 m から 5.6 m の地点について法先海底地盤の洗掘が報告されている。また、宮崎港の法先洗掘再現実験で、波を作用させただけでは法先の洗掘が生じなく、砂地盤を液状化させた実験を行った場合に、法先のブロックが沈下し、消波工全体の沈下が再現している (五明ら, 1995)。本実験とこれらの実験結果ならびに被災報告例を考慮すると単純に波を作用させただけでは法先洗掘を実験室規模で再現することは困難なことになる。そこで本研究でも種々の波浪・水深条件に対して漂砂の移動形態を観察した。水深 16.5 m から 22.5 m, 周期 12 s から 16 s, 波高 6.0 m から 12.8 m の不規則波を作用させたが護岸法先では堆積傾向が強く、著しい侵食は認められなかった。

この原因を検討するために流速分布を詳細に測定した。図-4 に不規則波が作用する場での護岸前面での平均流速と波高分布を示した。反射率が低いため部分重複波の波高分布は顕著にみられない。平均流速分布は全体的に沖向きであるが、底面上水深の約 1/3 の範囲では、沖向きから岸向きに変化している。対象とする基本設計波の非線形性は強いために砂は水深 0.5 m 当たりの場所から岸向きに運ばれる。平均流速は比較的小さために反射面である部分重複波の腹となる消波工の近傍に堆積するものと考えられる。このように平均流の流れのパターンが地形変化に大きく関わっていることがわかった。

以上のように不規則波による法先洗掘現象が再現できなかったため、対策工の実験として規則波を用いることにした。通常の護岸断面に対して規則波を作用させ、法先の侵食を生じさせた。次に対策工として、法先のグラベルマットを補強し同一の波浪を作用させ、対策工の効果を確認した。波浪条件は現地換算値で水深 41.25 m の

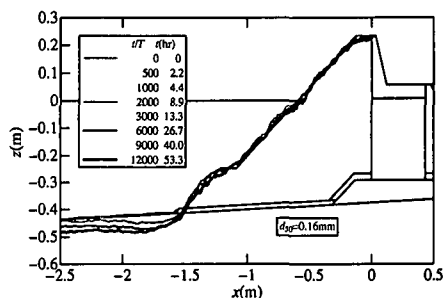


図-5 規則波による法先洗掘再現実験結果

地点の進行波高 13.4 m, 周期 16 s (縮尺 1/60 で $h=0.688$ m, $H=0.233$ m, $T=2.07$ s) である。作用波数は $t/T=12000$ (実時間換算 53.3 時間) とした。

断面の変形形状を図-5 に示す。法先で顕著な洗掘が生じ、グラベルマットの先端ならびに消波工の小段法肩が沈下した。洗掘深さは現地換算値で約 4 m である。洗掘幅は法先から沖向きに約 180 m で、最大水深は約 30 m である。30 m 以深に砂が堆積した。しかしながら、小段から上方の消波工の断面形状の変化はなく、この法先沈下の消波工本体への影響は認められなかった。消波工の断面形状の変化はむしろ波そのものの作用によるものであり、静水面近傍と天端での沈下が生じた。

ついで、対策工に関する実験を行った。対策工はグラベルマットを補強することで施した。五明ら (1997) は法先沈下の有無を法先のグラベルマットの幅 s と高さ t ならびに波高 H , 波長 L を含む指標で判定し、 $st/LH_{1/3} < 0.04$ で法先沈下が生じていることを示した。今回の条件を当てはめると対策工なしのもとでは、 $s=2.0$ m, $t=1.0$ m, $L=223.5$ m, $H=12.3$ m で、指標の値は $st/LH_{1/3}=0.0007$ となる。対策工としては約 60 倍の体積のグラベルマットを必要とすることになる。対策工なしの実験結果から法先では著しい小段の損傷はなかったもので、幅 $s=20$ m, 高さ $t=3$ m とし所要量の半分の 30 倍のグラベルマット先端部を設けることにした。ただし、全体のグラベルマットに要する体積は対策工なしに比べて約 2 倍である。図-6 に対策工を施した場合の地形変化を示す。 $t/T=12000$ で法先の砂面の最大洗掘深がほぼ一定になった。対策工を施した結果、グラベルマットの先端は法先の砂面の侵食の影響を受け傾斜面に転落するが、消波工本体への影響は全くみられなくなり、対策工の効果が確認できた。この結果は、清水ら (1994) の放水口前面の洗掘対策工でみられた現象と同一の原理に基づくものである。ただし、消波工の天端は同様に波の作用を受けわずかに沈下した。

図-7 に対策工なしとありとの最終地形の比較を示した。法先の最大洗掘深は両者でほとんど一致している。

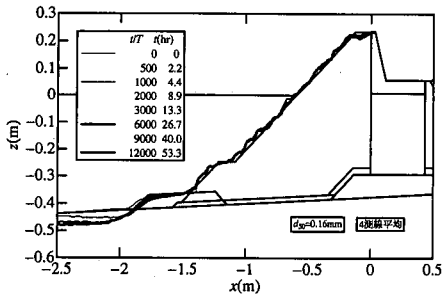


図-6 規則波に対する法先洗掘の対策工実験結果

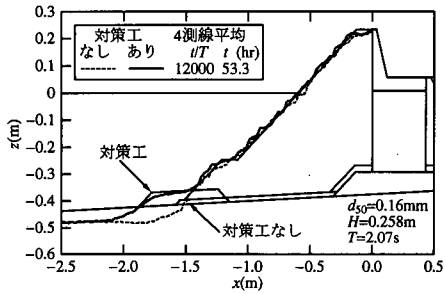
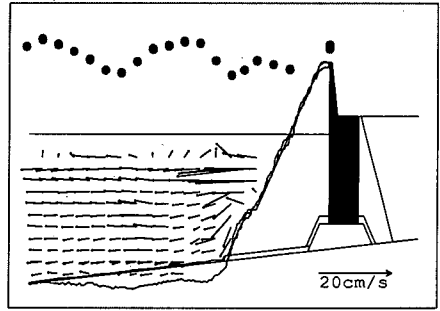
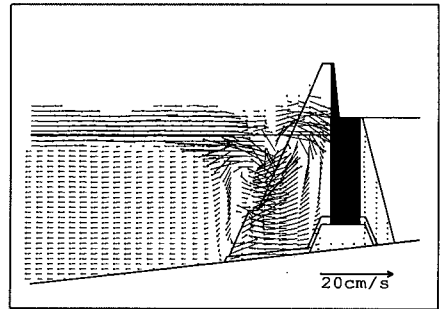
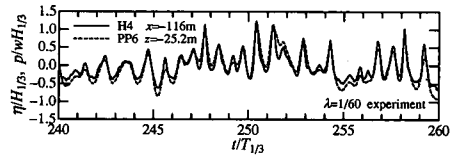
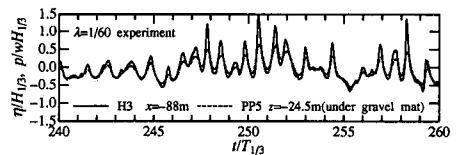


図-7 対策工ありなしの比較, 規則波実験 (中型実験)

対策工なしの場合には, 侵食された砂が沖に運ばれ堆積するために水深が浅くなる場所もある。

同様にこの規則波を用いた場合の平均流速の空間分布を求めた。図-8 にその結果を示す。規則波の場合には前出の不規則波の場合に比べて顕著に重複波が形成されていることがわかる。消波工法先で重複波の節になっている。法先での浸食は重複波の腹と節の位置に無関係に生じている。この範囲で顕著な沖向きの平均流速が発生している。ちなみに, 入江ら (1985) の方法に従って今回に条件を判定すると「L-タイプ洗掘: 重複波の節で洗掘, 腹で堆積」となる。

図-8 の規則波の結果は図-4 の不規則波の結果に比べて波高が大きいため, 両者の結果を比較することに無理がある。そこで, 不規則波の有義波高と等価なエネルギーを有する規則波の波高のもとでの平均流速の空間分布を数値計算モデルにより求めた。図-9 にその結果を示す。図-8 に比べて波高が小さくなくても同様の平均流のパターンが得られた。また, 既往の計算結果と同様に, 消波工法先では特有な循環流が生じている (Sakakiyama, 1996)。この結果, エネルギーが同レベルの波高の場合に不規則と規則波では平均流のパターンが異なることが明らかになった。このことから不規則波の作用のもとでは侵食の傾向になりにくいといえる。このように平均流の流れのパターンが消波工法先での洗掘現象を支配している。現地で生じている洗掘が単純に2次元の不

図-8 洗掘時の平均流速分布 (規則波, $H=15.5$ m)図-9 数値計算による平均流速分布 (規則波, $H=7.3$ m)図-10 水位変動と砂地盤内の間隙水圧, $\lambda=1/60$ 図-11 水位変動とグラベルマット下の間隙水圧, $\lambda=1/60$

規則波の影響だけではなく, 3次元的な流れも原因になっているものと考えられる。

図-10 は $1/60$ 実験の砂地盤中の間隙水圧の波形を示したものである。図中には実線で同じ地点の水位変動の波形も示した。図-11 と図-12 はそれぞれ $1/60$ 実験と $1/22.7$ 実験のグラベルマット中の間隙水圧の測定結果を示したものである。異なるスケールの実験で入射波形まで相似に設定していない。間隙水圧の変動は基本的には水面変位に連動するが波形が尖る位相でピークがなまる傾向にある。グラベルマットの下の間隙水圧の方が減衰が大きい。さらに, 図-13 は間隙水圧計の平均値の変

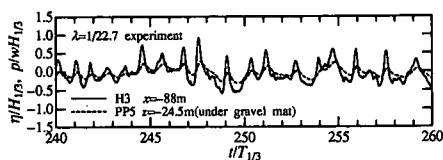
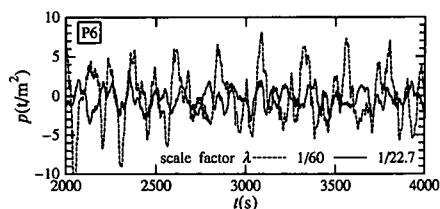
図-12 水位変動とグラベルマット下の間隙水圧, $\lambda=1/22.7$ 

図-13 砂地盤内の間隙水圧の変動

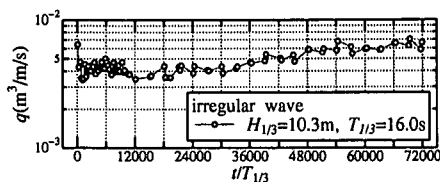
動をみるために移動平均を施した結果である。液状化に影響を及ぼす過剰間隙水圧の上昇はみられない。

以上から波の直接の影響を受ける砂地盤の液状化、さらにグラベルマットの下の砂地盤の液状化の可能性は認められない。

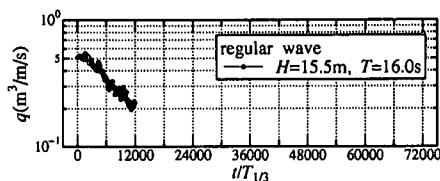
地形変化に伴う越波流量の変化を、堆積と侵食の両者の場合について図-14に示した。図-14(a)の堆積の場合は、波作用初期に越波流量は大きい。その後減少したのは波の作用に伴って消波工が沈下したためと考えられる。越波流量は $t/T=12000$ から明瞭に増加の傾向を示している。これは明らかに法先に堆積したことによる影響で生じたものである。波作用により消波護岸が安定した時点での越波流量が $3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$ であるので、およそ2倍の $7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$ に増加している。法先近傍での洗掘が生じなく、消波護岸の安定性を損なうことがない場合に、逆に法先近傍での砂の堆積により越波流量が増加することが確認された。一方、侵食により越波流量は減少することも今回の実験で明らかになった。

4. 結 語

本研究では2種類の縮尺の実験を実施し法先洗掘現象について検討した。設計波を含む種々の波浪条件、水深を変え実験を繰り返したが不規則波で法先洗掘は再現できなかった。一方、規則波では著しい洗掘が生じた。この堆積と侵食の違いを平均流速分布のパターンで説明した。規則波実験で対策工についても検討した。消波護岸の法先での局所的な地形変化が越波流量に及ぼす影響を示した。侵食では越波流量は減少する。一方堆積により越波流量は増加する。法先洗掘による消波ブロックの沈下が現地調査により報告されているものの、不規則波を用いた水理実験では法先洗掘を再現性できなかった。こ



(a) 法先堆積による越波流量の増加



(b) 侵食による越波流量の減少(規則波)

図-14 法先の地形変化に伴う越波流量の変化

の疑問の解明に向けて今後検討を進めたい。

本研究は、電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究として実施したものである。実験には(株)八重洲土木技術センター吉岡武男氏と(株)CRS稲葉大介氏、安川剛史氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢次(1984): 重複波による防波堤前面での海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 350-354.
- 運輸省第四港湾建設局(1990): 防波堤法先洗掘防止対策調査報告書, 118 p.
- 鹿島遼一・柳山 勉・沼水琢三・関本恒浩・京谷 修(1993): 安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 686-690.
- 五明美智男・堺 和彦・高山知司・寺内 潔・高橋重雄(1995): 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 901-905.
- 五明美智男・高橋重雄・鈴木高二朗・姜 閔求(1997): 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査(第2報)—消波ブロックの法尻沈下災害—, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 961-965.
- 柳山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩(1994): 多方向不規則波に対する人工島防波護岸の越波特性と耐波特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 656-660.
- 柳山 勉・香山真裕(1997): 砕波をともなう消波護岸への越波の数値計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 741-745.
- 沼水隆夫・池野正明・氏家久芳・山内一晃(1994): 放水口前面の洗掘対策工SPACの設計法, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 556-560.
- 土木学会(1994): 海岸波動(波・構造物・地盤の相互作用の解析法), pp. 491-508.
- 土木学会(1996): 原子力発電所の立地多様化技術, 第4編, 人工島式海上立地技術, 396 p.
- Sakakiyama, T. (1996): Scale effects in experiments on interaction of waves with permeable breakwaters, Doctoral thesis, The University of Tokyo, 192 p.