

潜水透水性構造物による波変形と内部流速場の ハイブリッド数値解析

水谷法美*・後藤敏明**・William G. McDougal***

1. 緒 言

幅広潜堤や人工リーフのような潜水透過性構造物は、環境面や波浪制御面の利点から今後建設機会の増大が予想される構造物である。こういった構造物は、一般に捨石やコンクリートブロックなどで構築されるため、耐波設計上被覆捨石や被覆ブロックの耐波安定重量を正確に算定しなければならない。最近、水谷ら（1994）は、幅広潜堤の被覆材の耐波安定重量を、被覆材の作用波力の関数として算定する方法を提案している。さらに、この作用波力の予測手法についても、モリソン式が有効であることが報告されている（Rufin, 1995）。したがって、潜堤内外の流速場の正確な予測が可能となれば、モリソン式による波力の予測が可能となり、被覆材の安定重量の算定する上で極めて有用になる。

潜水透水性構造物による波変形や内部流速場の数値解析手法は、これまでにいくつか提案されている（泉宮・遠藤, 1989；Somchai ら, 1989；磯部ら, 1991；松見ら, 1991；喜岡ら, 1994）。しかし、これらの多くは、潜堤内の非線形項を含む抵抗項を等価線形抵抗係数を導入して線形化を行っている。そのため、計算結果は等価線形抵抗係数の値に大きく依存することになるが、等価線形抵抗係数の値の詳細やその物理的な解釈などに検討の余地が残されている。一方、喜岡ら（1994）は、等価線形抵抗係数を使用するかわりに摂動展開を行って計算しているが、そのため非線形が強く現れる場合への適用は限られることになる。

本研究は、こういった問題点を克服し、潜水透過性構造物による非線形な波変形と潜堤内の流速場を同時に解析できる数値解析手法を提案するとともに、水理実験結果との比較によりその妥当性を検証するものである。ただし、対象とする波は非砕波とする。

2. 数 値 解 析

潜堤外部の波動場は非砕波の条件では非圧縮流体の非

回転運動が仮定できるため、速度ポテンシャルによる解析が可能である。一方、潜堤内部は、間隙内の流れは複雑であり非回転運動の仮定は成立しないと考えた方がよい。さらに、粘性による抵抗も極めて重要である。このため、本研究では、潜堤内外を異なる数値解析手法で計算し、両者を接続させるいわゆるハイブリッド型の数値解析を行う。

（1）潜堤外部領域の計算

まず、構造物の外部、すなわち波動場の計算は、大山・灘岡（1991）らによって提案された数値波動水槽を使用する。この数値波動水槽は、流体領域内に設けられた造波ソースと両端のスポンジ層、およびその外側の Sommerfeld 型の開境界から構成される。

基礎方程式は造波ソースを含んだポアソン方程式にグリーンの公式を適用して導かれる次式の境界積分方程式である（大山・灘岡, 1991）。ただし、底面の不透過条件、自由表面の運動学的境界条件、および左右の開境界の放射条件は既に考慮してある。

$$\begin{aligned} \alpha(Q)\phi(Q) + \int_{S_r \cup S_n \cup S_{ns}} \phi \frac{\partial G}{\partial n} ds + \int_{S_v} v_n G ds \\ - \int_{S_f} n_z \frac{\partial \eta}{\partial t} G ds + \int_{S_s} U G ds \\ + \frac{1}{\sqrt{gh}} \int_{S_2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi + \int_{x_2}^{x_1} \mu_x \phi |s_r| dx \right) G ds \\ + \frac{1}{\sqrt{gh}} \int_{S_1} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi - \int_{x_2}^{x_1} \mu_x \phi |s_r| dx \right) G ds = 0 \quad \cdots (1) \end{aligned}$$

ここに、 Q は着目点、 α は点 Q を挟む要素のなす角、 ϕ は速度ポテンシャル、 η は水位変動、 v_n は潜堤表面の法線方向流速（流量流速）、 g は重力加速度、 h は静水深、 μ と μ_x はスポンジ層の抵抗係数とその x 方向の変化率、 U は造波ソースの発生させる流速、 S は境界であり、 S_f や x_1 などの記号は図-1に示すとおりである。また、 G はグリーン関数で、底面の不透過条件を自動的に満足さすよう次式で与えるものとする。

$$G = \ln \frac{1}{r} + \ln \frac{1}{r'} \quad \cdots (2)$$

ここに、 r と r' はそれぞれ境界上の点およびその底面に関する鏡像点と着目点 Q の距離である。大山・灘岡は不透過構造物を扱っているが、本研究では透水性構造物を

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 愛知県都市計画課

*** Ph.D. Professor, Oregon State University Dept. of Civil Engineering

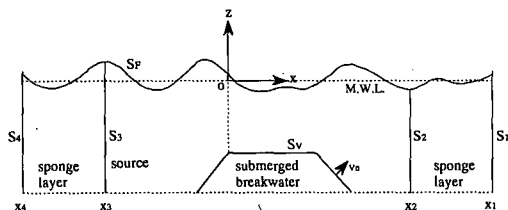


図-1 計算領域の概念と記号の定義

扱うため、構造物表面の法線方向流速 v_n を未知数として定式化を行っている。

さらに、自由表面では、式 (3) に示す力学的境界条件が課せられる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ (n_z)^2 \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial s} \right)^2 \right\} + g\eta + \mu\phi - \int_{x_1}^x \mu_x \phi|_{S_F} dx = 0 \quad (\text{on } S_F) \quad (3)$$

(2) 潜堤内部領域の計算

潜堤内部の流速場を、水平・鉛直方向流速（流量流速） u 、 w と波動圧 p を変数として重み付き残差法に基づく有限要素法により計算した。基礎方程式は式 (4) に示す連続式と式 (5) と式 (6) に示す水平・鉛直方向の運動方程式である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{mg} \left(1 + \frac{1-m}{m} C_m \right) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{m^2 g} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4.6\nu}{gmd^2} u + \frac{0.79}{gd\sqrt{m}} u \sqrt{u^2 + w^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{mg} \left(1 + \frac{1-m}{m} C_m \right) \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{m^2 g} \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{4.6\nu}{gmd^2} w + \frac{0.79}{gd\sqrt{m}} w \sqrt{u^2 + w^2} = 0 \quad (6)$$

ここに、 $P = z + p/\rho g$ 、 x と z は水平・鉛直座標（図-1 参照）、 m は空隙率、 g は重力加速度、 C_m は付加質量係数、 ν は水の動粘性係数、 d は空隙の代表径、 ρ は水の密度である。式 (5) と式 (6) に示した運動方程式は基本的には従来の解析と同様である。しかし、本研究では、各項の係数として、一方向流を対象に McCorquodale・Hannoura (1978) によって提案されている値をそのまま使用した。そして、従来のようなローレンツの等価仕事原理による第 4、5 項の抵抗項の線形化を行うことなしに有限要素法の定式化を行った。

また、潜堤内の流れに対する底面境界条件として、次式の不透過条件が課せられる。

$$w = 0 \quad (\text{on } z = -h) \quad (7)$$

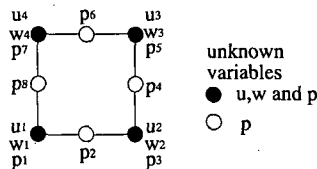


図-2 四角形要素の変数の配置

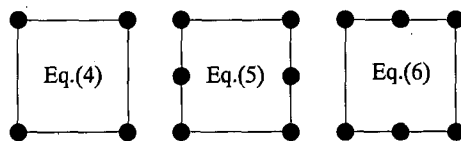


図-3 重み付き残差法の重みの配置

(3) 接続条件

潜堤表面での解の接続のため、潜堤表面での法線方向の流量の連続条件と圧力の連続条件を与える。これらの条件は以下のように表記できる。

$$u \cos \theta + w \sin \theta = v_n \quad (8)$$

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ v_n^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial s} \right)^2 \right\} + \rho g z \quad (9)$$

ここに、 θ は x 軸から潜堤要素の法線まで反時計回りに測った角度である。

(4) 要素分割と離散化

潜堤外部の領域はそれを取り囲む領域を全て線形要素として扱った。また、自由表面での運動学的境界条件は圧力方程式として、線形要素とそれに対応する重み関数を導入し、重み付残差法による定式化を行った（大山，1991）。

一方、潜堤内部の領域は有限要素法を使用し、要素分割には四角形要素を使用した。未知数の配置として、図-2 に示すように、流速には 4 節点の線形要素を、圧力には 8 節点の 2 次要素を用いた。また、重み付残差法を適用する際の重みを図-3 のように配置させ、未知数の数と式の数とを一致させた。

以上の要素と重み関数を使って基礎方程式、境界条件を離散化した。

(5) 時間発展の計算

全ての変数を前のタイムステップの値と時間増分 Δt 内の増分の和として表示する。すなわち、 u について例示すると次式のようなになる。

$$u^{(n)} = u^{(n-1)} + \Delta u \quad (10)$$

ここに、上付きカッコ内の n は n 番目のタイムステップの値であることを示す。さらに、大山らと同様、各変量の時間による微分量が Δt 時間内に線形的に変化すると考えると、例えば $\partial u / \partial t$ は

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^{(n)} = \frac{2\Delta u^{(n)}}{\Delta t} - \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^{(n-1)} \dots\dots\dots (11)$$

のように表すことができる。ただし、自由表面上の $\partial\phi/\partial t$ については、さらに自由表面の時間変化にともなう項も付加した (大山, 1991)。

以上の関係式を離散化した方程式に代入し、時間増分内における各変量の増分が小さいと仮定し、増分の2次以上の項を無視すると、着目したタイムステップの各変量の増分を未知変数とした連立一次方程式が導かれる。この連立一次方程式を解き、さらに自由表面の境界条件を満足するように収束計算を行うと全ての変量の時間発展が計算できることになる。

3. 実験条件および計算条件

(1) 水理実験

静水深 $h=28$ cm と 30 cm の2種類に対して水平床の模型実験を行った。入射波は規則波とし、周期 T を 1.0, 1.4, 1.8 s の3種類、入射波高 H を 3.0 cm と 5.0 cm の2種類変化させた。いずれも非砕波の波である。潜堤の模型を直径 $D=3.0$ cm のガラス球を使って、天端幅 $B=220$ cm, 法面勾配 1/3.2 になるよう構築した。天端上水深はそれぞれの静水深に対し、7 cm と 9 cm である。実験では、潜堤上およびその近傍の水位変動を 10 cm 間隔で 61 箇所計測し、さらに潜堤表面上の水平・鉛直方向流速を 10~12 箇所計測した。

(2) 計算条件

計算領域は、造波ソースを構造物の反対側のスポンジ層前面に配置し、潜堤を造波ソースより 1.5 波長離れた位置に設置した。潜堤背後とスポンジ層前面の間にさらに 1 波長分の計算領域を設けた。スポンジ層の長さは、両側とも 1 波長とした。なお、2つのスポンジ層の抵抗係数を、ともに開境界で $\mu_{\max}=0.25\sqrt{g/h}$, 内側で 0 となるよう線形分布させた。また、潜堤内の流れに計算に際し、 C_M の値を 0.3, 空隙の代表径 d は空隙の体積を表面積で除した値を使用した。なお、造波ソースで与える流速として、今回は微小振幅波の流速を与えた。

計算対象の潜堤の形状も、模型実験と同じ形状にして定式化とプログラミングを行ったが、計算機の記憶容量の関係で台形形状での計算が行えなかったため、同じ高さと天端幅を有する矩形の潜堤を採用した。

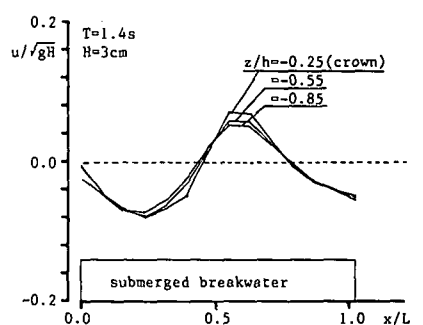
境界要素法の要素分割は、自由表面を $L/20$ (L は波長) の長さに、開境界の鉛直断面を $h/6$ の長さの要素に分割した。潜堤表面は、水平方向に 9 分割、鉛直方向に 5 分割し、潜堤内に適用した有限要素法の四角形要素の大きさもそれに従った。

(3) 計算結果の予備検討

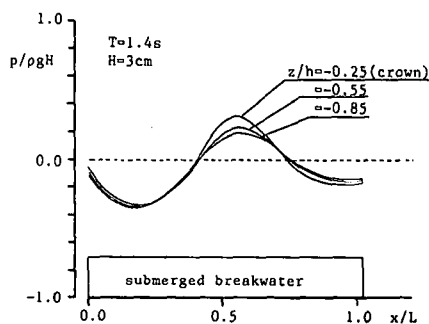
有限要素法では、一般に圧力の内挿関数は流速の内挿

関数より低次のものを使用されてきた。これは、主にストークス仮説に基づいて圧力と応力、および歪み速度との関係から決められたものである。本研究で採用する潜堤内の流れの運動方程式は、粘性にともなう抵抗項を式の中に含んでいるものの、基本的には非粘性流体の運動方程式となっているため、上述の関係は成立せず、むしろ加速度 (空間的には流速と同じ変化率) と圧力勾配が空間的に同じオーダーで変化すると考える方が妥当であると考えられる。したがって、本研究では、前章で既述したように、圧力の内挿関数の次数を 1 次上げて 2 次のものを使用して計算を行った。

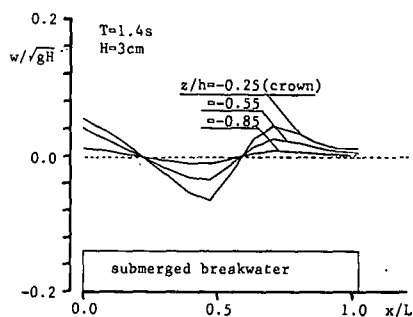
図-4 に計算結果の一例を示すように、圧力・流速の変化特性はともに妥当なものと思われる。図示していない



(a) 水平方向流速

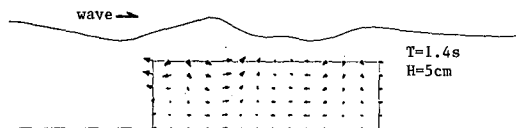


(b) 鉛直方向流速



(c) 圧力

図-4 流速と圧力の変動特性の計算例



図—5 水面波形と流速ベクトルの計算例

が、1次の内挿関数を使用した場合、圧力の変動特性は非常に良好な結果が得られたが、流速の変動特性には極めて大きな振動が現れた(後藤, 1995)。したがって、圧力の内挿関数を流速のものより1次高次にした方が安定した流れの解析が行えるといえよう。

図—5は潜堤上の波変形と潜堤内の流速ベクトルの様子を示したものである。潜堤による急激な水深変化にともない、不透過潜堤の場合ほど顕著ではないが、高次の周波数成分の波の形成が認められる。

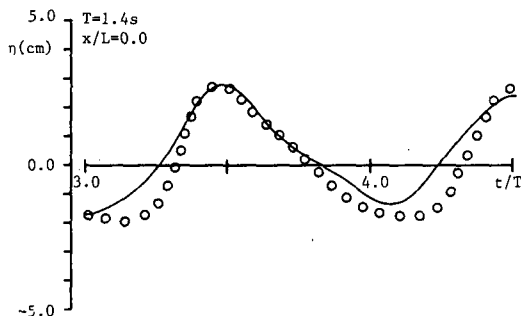
一方、潜堤内の流速ベクトルの様子より、波の峰の位置では岸向きの流れが、谷の位置では沖向きの流れが再現されており、さらにゼロアップクロス点やゼロダウンクロス点ではそれぞれ上向き、下向きの流れが再現されていることがわかる。そして、これらの流れは一般に底面に近づくほど小さくなっており、本計算手法の妥当性が定性的に示された。

4. 計算結果および考察

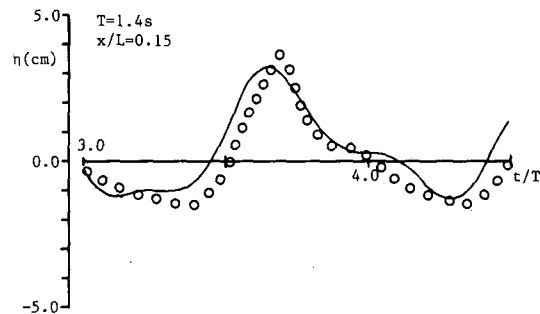
(1) 水位変動

本手法による水位の時間変化の計算結果を実験値と比較した例を図—6に示す。既述したように、計算対象が矩形の潜堤であるため、実験結果とそのまま比較はできないものの、計算値、実験値ともに $x/L=0$ となる法肩では波峰の前面が急になり、逆に後面が緩やかになる。波が構造物上を進行するにしたがい、波峰はより急峻になり、その後面で高次周波数の波の発生のため、ステップ状の時間変化を示すようになる。さらに波が進行すると、図—5に示した空間波形に見られたように波の谷の位置に高次周波数成分の波の峰が明瞭に現れるようになる。実験値と計算値では特に波峰の急峻さに差が認められるが、これは構造物の形状の差が影響していると考えられる。

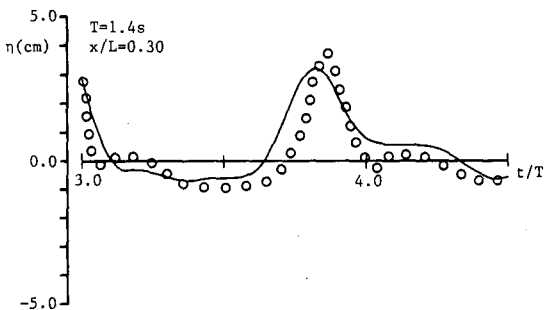
図—7は水位変動のrms値の変動特性を比較したものである。実験値、計算値ともに構造物前面で振動し、構造物上で徐々に減少する。そして、構造物背後で一定値に収束する。計算と実験では構造物の形状が異なり、矩形の潜堤を対象にした本計算結果は反射率が大きくなるため、構造物前面の値に有意な差が認められるが、構造物上で η_{rms} が減少する傾向、さらにその割合の再現性は良好である。 η_{rms} は波動エネルギーに関連する物理量であることを考慮すれば、本計算手法は潜堤内の抵抗によ



(a) $x/L=0.0$

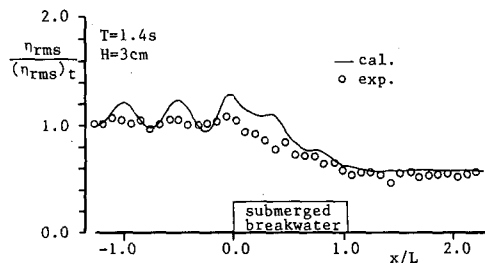


(b) $x/L=0.15$



(c) $x/L=0.30$

図—6 水位変動の比較



図—7 η_{rms} の変動特性

るエネルギー損失も妥当に評価しうることが指摘できる。本計算手法では比較対象となる実験結果より同定するパラメータは使用しておらず、この面からも反射率や透過率によって決められる線形抵抗係数を使用する手法

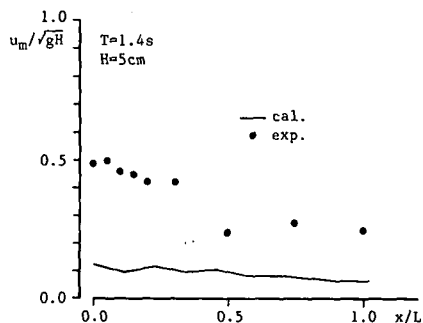


図-8 水平方向最大流速の変動特性

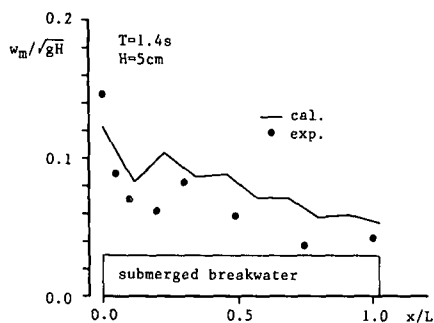


図-9 鉛直方向最大流速の変動特性

より有効であると考えられる。ただし、本計算で使用している運動方程式の係数は、一方向の流れに対するものであり、波動場に対するこれらの値の妥当性については更なる検討が必要である。

(2) 潜堤表面の最大流速の変動特性

幅広潜堤の被覆材の作用最大波力の算定にモリソン式が有効であることが示されているが、その算定には潜堤表面での流速の変動特性、特に最大流速の精度よい予測が必要である。図-8と9にそれぞれ潜堤天端上の水平・鉛直方向の最大流速の比較例を示す。水平方向流速については実験値がかなり大きく、計算値の約4倍の値になっている。ところで、実験の制約上、潜堤内の流速を直接計測するのは困難であるため、実際に計測しているのは潜堤外部の流速である。一方、計算値は、流量流速であり、実流速を空隙率を考慮して平均化した値である。したがって、比較する流速自体に差があるため、図面上で大きく差が現れたものである。しかし、空隙率(本実験では26%)により流量流速を実流速に換算して比較すると両者はほぼ同程度の値となる。これに対して、鉛直方向流速の計算値は実験値に近いことが認められる。ここでは、鉛直上向きの流速を示しているが、流速計のセンサー真下には被覆材と空隙が混在しており、したがって計測した鉛直上向きの流速は流量流速のような平均

値に近いことになる。このため両者の差が小さくなったと推察される。以上の結果を総括すると、構造物表面での流速の予測に対しても、本計算手法は有効であるといえる。

5. 結 言

以上、本研究では、波動場に設置された透水性構造物による波変形と内部流速場の数値解析手法を提案した。その結果、潜堤内の流れの有限要素解析において、圧力の内挿関数を1次高次にするにより、安定した流れの計算が可能であること、また、本解析手法は潜堤による波変形や、流速場の予測に有効であることが明らかとなった。しかし、基礎方程式中の抵抗項のより精度高い評価や計算の効率化などいくつかの課題を残している。今後、こういった課題を更に検討していく所存である。

謝辞：本研究は、著者の一人(水谷)が鹿島学術振興財団より補助を受け、1年間の米国 Oregon 州立大学での研修中に開始したものであり、このような機会を与えていただいた同財団に感謝の意を表する次第である。また、Oregon 州立大学での研修をすすめていただいた名古屋大学岩田好一朗教授に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 泉宮尊次・遠藤雅人 (1989): 潜堤および透過性構造物のある海浜における波動解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 638-642.
- 磯部雅彦・芝 和彦・Eric Cruz Cruz・渡辺 晃 (1991): 透過潜堤による非線形波浪変形について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 551-555.
- 大山 巧・灘岡和夫 (1991): 数値波動水槽を用いた潜堤による波の分裂現象の解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 19-20.
- 大山 巧 (1991): 数値波動水槽の開発と非線形波動解析への応用, 東京工業大学博士学位論文, 132 p.
- 喜岡 渉・甲斐宏典・平岡慎司 (1994): 透水層上の長波方程式と透過潜堤への適用性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 711-715.
- 後藤敏明 (1995): 没水透水性構造物による波の変形に関する研究, 名古屋大学修士論文, 24 p.
- Somchai Rojanakamthorn・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 透過潜堤による波浪変形モデル, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 643-647.
- 松見吉晴・石田明雄・木村 晃 (1993): 幅広潜堤内に発生する流体圧力の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 781-785.
- 水谷法美・岩田好一朗・Teofilo M. Rufin Jr.・戸塚奈津子・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.
- McCorquodale, J. A. and Hannoura, A. A. (1978): Hydraulic conductivity of rockfill, J. Hydraulic Research, No. 2, pp. 123-137.
- Teofilo M. Rufin Jr. (1995): Stability and wave force of armor rubble stone of a wide-crown breakwater, Doctoral Dissertation, Nagoya University, 182 p.