

藻場造成機能を有する多孔質ブロックの 水理特性に関する研究

A STUDY ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF A BLOCK WITH PERFORATIONS FOR ARTIFICIAL FORMATION OF SEAWEED BED

辻本剛三¹・竹原幸生²・柿木哲哉³・西畠泰司⁴・平井登⁵
Gozo TSUJIMOTO, Tetsuya KAKINOKI and Shohachi KAKUNO

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正会員 博士(工学) 近畿大学助教授 社会環境工学科 (〒577-2502 東大阪市小若江3-4-1)

³正会員 博士(工学) 神戸市立高専講師 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町8-3)

⁴ 丸一建設株式会社 (〒656-0322 三原郡西淡町987)

⁵ (株) 工研設計 (〒650-0022 神戸市中央区元町通3-17-11)

The hydraulic characteristics of a block with perforations are studied experimentally and theoretically. The present paper is threefold: a field test to examine the stability of block and the growth of seaweed; an experimental study to measure a reflection coefficient, a transmission coefficient and a rate of wave energy dissipation; and a numerical simulation to examine the flow field over the mound with blocks by employing the $k-\epsilon$ turbulence model which has considered the perforations of blocks.

It was found through the field test that the stability of prototype models was extremely high and many kinds of seaweed have been adhering to blocks. The number of stability could be calculated with a ratio of submerged depth of crown and a wave height. Also wave energy dissipation could be promoted over blocks. The agreement between experimental data and the calculated values by the numerical simulation for the transmission coefficient and wave profiles over the blocks is found to be good.

Key Words : Seaweed Bed, Numerical Simulation, Perforations, $k-\epsilon$ Turbulence Model

1. はじめに

人工リーフは水中に没しており景観を阻害しない利点があり, また海水の流動を妨げ難い構造となっているため, 沿岸域で多数設置されている。しかしながら, 設置場所が比較的海岸線に近い場合, 設置に伴い周辺の生態環境, 特に藻場を消失する場合もあり防災と環境の両立が難しい側面がある。藻場の再生を試みる場合には, 可能な限り元の場所近傍が望ましいが, 必ずしも適切な場所が得られるとは限らない。その様な観点から人工リーフの天端上の水域は, 海水の流動は阻害されず活発であり, 太陽光が底面近傍まで到達するため藻場の生育に適した場所であると考えられる。しかし, 天端上では水深が急激に変化し, 砕波や速い流れ場が形成されそのままの状態では, 藻場の生育には厳しい水域である。そのために, 流動を低減し, 急激な砕波を生じ難くさせ, 藻場の着底が可能な水域条件にする必要がある。

本研究では多孔質を有するブロックを人工リーフ

の天端上に設置し, 藻場の生育環境の可能性を検討するため, それに伴う波高, 流動特性, ブロックの安定性などを実験的, 理論的に検討したものである。また現地で藻場付着を確認するための現地調査も併せて実施した。

2. 現地調査

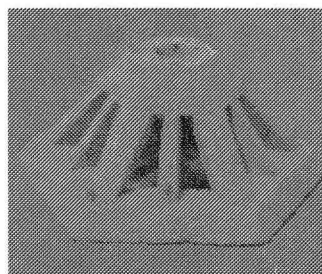


図-1 模型ブロック

本ブロック(模型)は図-1に示すように重心が低く, 安定性に富んだ形状になっている。実物の上部には藻場造成効果を期待して, 藻場基質板が取り付けられている。平成14年12月, 兵庫県淡路島西

淡町湊地先(図-2)の水深6mの地点に実物のブロックを10基設置した。底質はやや粗い砂地であった。平

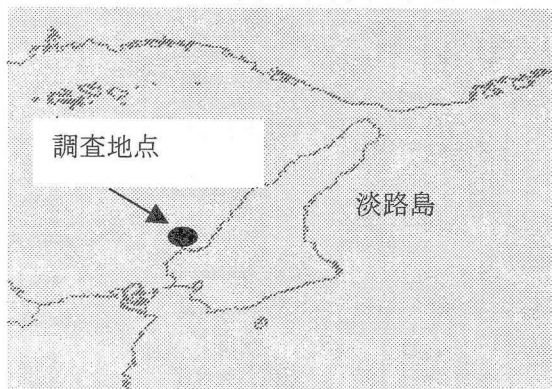


図-2 現地調査場所

成16年3月にダイバーによる坪狩, 目視観察, スチル・ビデオ撮影による現地調査を実施した。目視調査では出現種は11種類あり, カジメ, ホンダワラ類である。付着被度は上部95%, 下部85%で共に濃密生状態である(表-1)。上部の出現種数は4種類, 下部は11種類であり, 下部の方種類が多く, 面積の違いと考えられる。

表-1 海藻の被度率 (種別の被度: %)

出現種			上部	下部
緑藻	アオサ科	アナアオサ	50	20
褐藻	コンブ科	カジメ ワカメ	+	+
	ウルシグサ科	ケウルシグサ		15
	ホンダワラ科	アカモク		5
		タマハハキモク ホンダワラ		+
紅藻	カクレイト科	ムカデノリ		+
	フジマツモ科	ショウジョケノリ	35	20
	ダルスコ	タオヨギソウ		+
	不明種		10	10

図-3に25cm四方の坪狩りの様子, 表-1にその調査結果を示す。上部では10種(131.3g), 下部6種(63.2g)であり, 小型海藻は上部に多い。出現種は下草として重要であり, 藻場を構成する多年生であった。

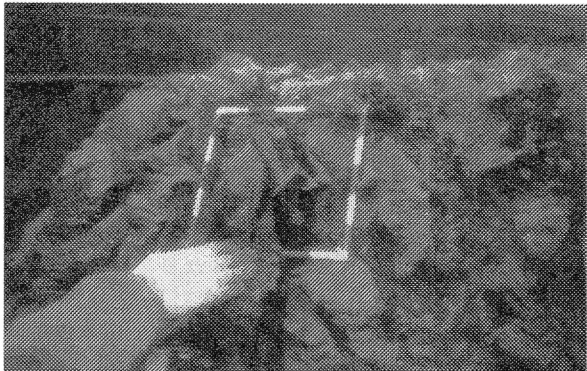


図-3 坪狩りの様子

表-2 海藻の坪狩調査結果

出現種			上部	下部
緑藻	アオサ科	アナアオサ	32.3	20.8
褐藻	コンブ科	カジメ ワカメ	1.3(1) 3.2(1)	0.2(1)
	カヤモリ科	ハバノリ フクロノリ	0.5(1) 7.2	
紅藻	カクレイト科	ムカデノリ	0.8(2)	0.9(2)
	フジマツモ科	ショウジョケノリ	70.1	37.5
	ダルスコ	タオヨギソウ	8.7(3)	0.9(1)
	テングサ科	テングサ類	0.8	
不明種			6.4(2)	2.9
合計			131.3g	63.2g

カッコ内は個体数

3. 安定性実験

約1年3ヶ月の現地試験期間中, 冬期波浪の影響を2シーズを受けたが, 転倒等の被害はなかった。しかしながら, 本ブロックは人工リーフの天端上に置されるために, その安定性の確認を行った。

(1) 実験方法

実験は近畿大学所有の長さ36m, 幅1m, 高さ1mの二次元造波水槽を用いた。水路中に粒径2~4cm程度の砂利を用いて, 沖側1:3, 岸側1:1.5の法面を有する天端長さ65cmのマウンドを設置し, 実物大の1/40の模型(図-1)を図-4のように設置した。模型の平均重量, 標準偏差はそれぞれ, 232.5g, 15.8gであった。実験条件を表-3に示す。

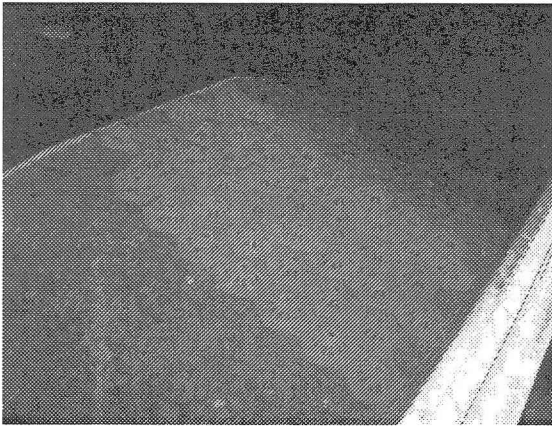


図-4 ブロックの設置

表-3の条件下で周期0.54~1.5秒, 波高2.5~16cmの波を200~300波作用させ, 目視によりブロックが移動もしくは転倒した個数を全体の個数で除した値を被災率と定義した。

(2) 実験結果

沖側の法面に接した場所に設置されたブロックが被災した以外は安定していた。図-5に天端上水深Rをパラメーターとして, 波高と被災率の関係を示した。図より天端上水深毎の被災限界波高Hcを最小自乗法で算定し, この限界波高を用いて安定係数を算定した。実験は水平マウンド上で行ったので安定係数は, Hudsonの式において斜面勾配角の影響を除い

て求めた。

表-3 実験条件 (安定性)

	水深 h(cm)	天端上水深 R(cm)	マウンド高 D(cm)
case1-1	30	15	15
case1-2	25	10	
case1-3	20	5	
case2-1	60	10	50
case2-2	65	15	
case2-3	55	5	
case3	19	2	17

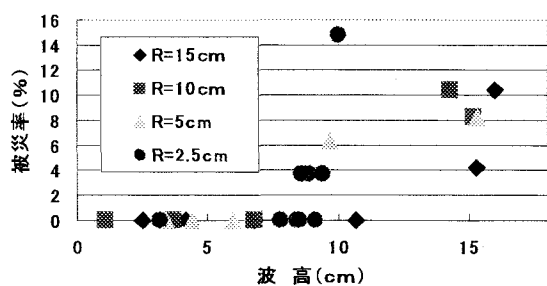


図-5 被災率と波高の関係

R/Hをパラメーターとして整理した結果を表-4にその結果を示す。安定係数 N_s は式(1)で与えられる。

$$N_s = 0.0863 \times (R/H)^2 + 1.089 \quad (1)$$

表-4 安定係数

天端上水深 R(cm)	限界波高 Hc(cm)	安定係数 N _s
2.5	5.6	0.98
5	4.6	0.8
10	6.6	1.51
15	10.9	1.91

4. 反射率・透過率

(1) 実験方法

実験は神戸市立工業高等専門学校所有の長さ18m、幅0.6m、高さ0.9mにおいて図-6に示すようなマウンドを粒径2～4cmの砂利で作成した。

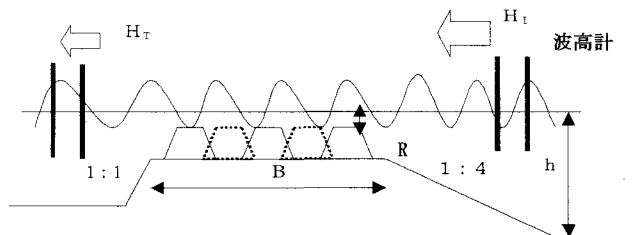


図-6 実験断面

表-5に示す実験条件において周期0.69～1.47秒、波高3～10cmの波を30波程度作用させ、入射分離計算を行い、入射波、反射波、透過波を算定した。

表-5 実験条件 (反射・透過率)

水深 h(cm)	天端上水深 R(cm)	天端幅 B(cm)
35.5	7	48
		72
		96
31.5	3	48
		72
		96
28.5	0	48
		72
		96

(2) 実験結果

図-7にR/HをパラメーターとしてB/Loと反射率の関係を示す。なお、ブロックの有無による水理特性を検討するため、R/Hの値は図-5に示すようにブロック上の水深を基準にしている。ブロックによる反射率は0.2以下と小さく、マウンドのみの場合と同程度以下である。特に長周期側の低下が顕著であり、ブロックを設置しているにも関わらず、反射率が低減している。その要因として、多孔質体であるブロック内で、エネルギーが効果的に消費されているのではないかと推定される。

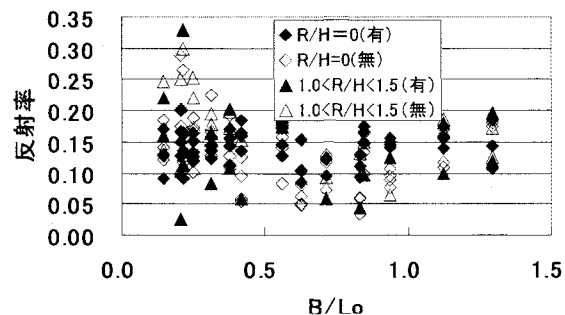


図-7 反射率とB/Lo

図-8に図-7と同様なパラメーターで透過率とR/Hとの関係を示す。天端上水深は実質的にブロックが設置された方が浅いので透過率は低下している。しかしながら、R/Hの値が増加するについて両者の差は小さくなっている。

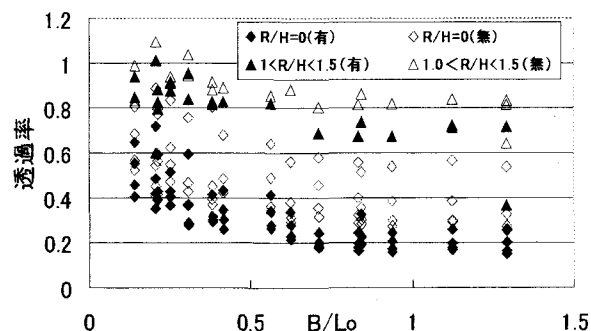


図-8 透過率とB/Lo

図-9には、 $1 - (\text{反射率})^2 - (\text{透過率})^2$ で算定したエネルギー損失量とR/Hの関係を図-7と同様なパラメーターで示す。

ブロックの設置により反射率が低減しているにも関わらず(図-7より)、エネルギー損失が10~20%程度増加しており、ブロック内で効率的にエネルギーが消費されていると考えられる。

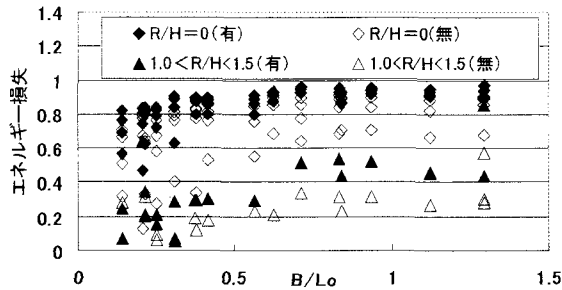


図-9 エネルギー損失とB/Lo

5. 理論的検討

(1) 概要

多孔質を有するブロック周辺の水理特性を理論的に扱う際には、多孔質部の扱いが重要になってくる。通常このような場合、ダルシー則の適用が一般的であるが、粒子レイノルズ数が10以上になるとダルシー則の適用が困難になるとされている⁴⁾。また、本ブロックのような形状では、多孔質内において種々のスケールの渦が形成され、乱れの影響を無視することができない。このような場合、“microscopic”あるいは“macroscopic”による検討が一般的であり、前者の方が厳密に扱える利点があるが、本ブロックの形状は複雑であり、また、実務的な立場からでは後者の扱いが都合がよい。このような観点から著者¹⁾は透過性構造物周辺の底質の移動に関する検討を行っている。

(2) 基礎式

基礎式は著者^{2) 3)}が波動場の底面近傍や構造物周辺の流れや底質移動の検討に用いた枠組みにPrinosら⁵⁾と同様な考え方で多孔質の影響を考慮した、水平、鉛直の2次元場とした。具体的な式は以下のようである。

運動量方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g \delta_{i2} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[J \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] - \phi \frac{\nu}{K} U_i \quad (2) \\ & - \phi^2 \frac{C_F}{\sqrt{K}} \left[\sqrt{U_j U_j} U_i + \frac{U_j}{\sqrt{U_j U_j}} \overline{u_i u_j} \right] \end{aligned}$$

連続式

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $i=1,2$ ：水平、鉛直方向、 U_i ： x_i 方向の平均流速、 ρ ：密度、 p ：圧力、 δ_{i2} ：クロネッカのデルタ関数、 $-\overline{u_i u_j}$ ：レイノルズ応力、 J ：多孔質部の内と外との粘性係数の比（ここでは、 $J=1$ ）、 ν ：動粘性係数、 ϕ ：空隙率、 K ：透水係数、 C_F ：Forchheimer係数である。式(3)の2重の下線部が多孔質内において考慮される項である。

(3) 乱流モデル

式(3)の方程式をクローズするためにレイノルズ応力は乱流モデルにより算定する。多孔質部外は通常の2方程式系の $k-\varepsilon$ 乱流モデル⁶⁾を用いることができるが、多孔質内は種々の渦スケールが存在する流れ場であるために、通常のモデルは適用できない。このような場での乱流モデルの検討は近年行われ始めているが⁷⁾波動場を対象とした議論はなされていない。そのため、ここではMasuokaら⁸⁾によるゼロ方程式系の乱流モデルを用いて、渦動粘性係数 ν_t を算定する。

$$\nu_t = \frac{F}{\sigma} \rho \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \sqrt{K} \quad (4)$$

ここで、 σ ：ダルシーの法則の概念を乱流場に拡張した事を考慮した係数であり、ここでは $\sigma=1$ とした。さらに

$$F = \frac{1.75}{\sqrt{150\phi^3}} \quad (5)$$

$$K = \frac{\phi^3 d_p^2}{150(1-\phi)^2} \quad (6)$$

である。ここで、 d_p ：多孔質の代表径である。

(4) 計算方法

多孔質内部と外部は計算格子にフラッグを付けて区分した。前述のように乱流モデルは多孔質内部では、ゼロ方程式、外部は2方程式を用いた。ブロック上ではエネルギー減衰に伴い、水面形状が変動するために計算格子を境界面に適合させるように座標変換を行った。水平方向を5cm間隔で120分割、鉛直方向を40分割、時間間隔を0.001秒として計算を行った。境界条件、計算手順等に関しては、著者²⁾が行った方法を用いた。

ブロックの代表径はその体積を球体と仮定して求め、空隙率は天端上のブロックが設置している空間体積と前述のブロック体積の比より算定した結果、代表径4cm、空隙率0.8として式(5)、(6)に用いた。

(5) 計算手法の妥当性

計算手法の妥当性を検討するため、水深0.28m、波高0.067m、周期1.24秒の波浪条件で図のようなマウンド上に置かれたブロック上の波高の変化を調べた。ブロックを設置することにより天端上では、砕波が生じ難くなり、穏やかに波高変化が生じた。図-10にブロック上の水面形状の比較を示す。水面形はデジタルビデオカメラで撮影し、直接画像より読み取った。図中の○、△が異なる位相での実験結果である。両者の対応は比較的良好であることが判る。

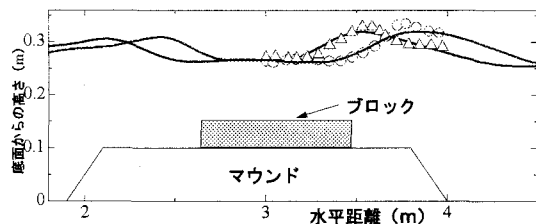


図-10 水面波形の比較

図-10に透過率の実験と計算との比較を示す。計算による結果の方が、20%程度小さくなっているが、概ね両者の対応は良好である。

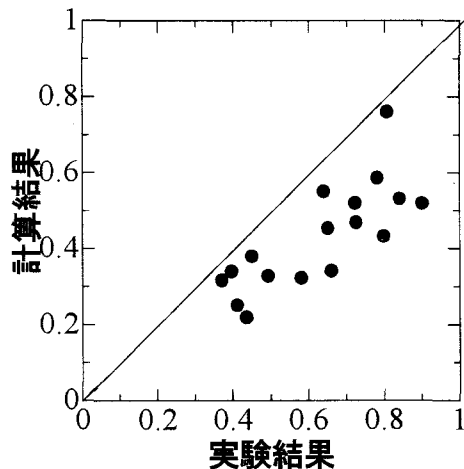


図-11 透過率の実験と計算の比較

(6) 計算結果

図-6のマウンド条件下における計算結果の例を図-12(波高0.071m、周期0.86秒、水深0.355m)に示す。図中ブロックは四角の枠で表示している。

マウンドの法面を遡上してきた波は底面の影響を受け、波形が変形してくる。マウンド層は透水性を有しているため、層内にも流動が見られる。そのために、波形の変化は急激ではなく、徐々に変化していることが判る。ブロック内の流速はマウンド内に比べてその値は大きい。マウンドの上端から流速が下方に向かって増加し、境界層の形成が見られる。

図-13に図-12の $t/T=9.3$ における、流動と乱れエネルギーの分布のブロックの有無による差を示す。乱れエネルギーの間隔は 0.001 (m/s)^2 である。そのために図の横軸の範囲を縮小している。通常、天端上では水深の急激な変化のために、底面の条件に

よって砕波が生じたりして乱れが著しくなる。ブロックの有無による流動の差はあまり見られないが、乱れエネルギーのブロック内では小さいことがわかる。また、マウンド内の乱れは極めて小さい。

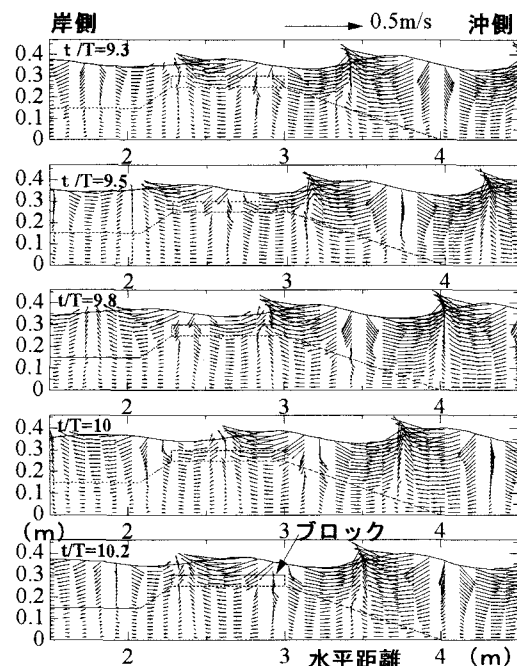


図-12 水面形状と流速の分布

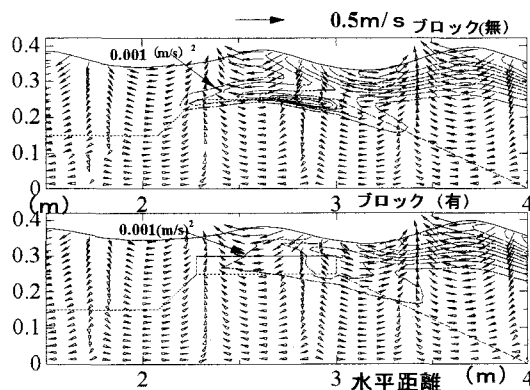


図-13 ブロックの有無による相違

6. 結論

人工リーフ天端上で藻場造成の可能性を検討するために現地調査、室内実験、数値計算を行った結果次のような知見を得た。

- ① 1年3ヶ月の現地試験では、冬季波浪期間を2シーズン受けたがブロックは安定し、数種類の海藻の付着が確認できた。
- ② ブロックの安定係数は1～2程度であり、天端水深波高比で推定できる。
- ③ ブロックの設置により波エネルギーが10～20%減

衰し、反射率も低減した。

④乱流モデルに多孔質部の影響を考慮した計算手法の妥当性が確認できた。

参考文献

- 1) 辻本剛三・柿木哲哉・浜浦雄大・重松孝昌・日下部重幸：Macroscopic乱流モデルを用いた透過性構造物内外の底質移動に関する研究，海岸工学論文集，投稿中
- 2) 辻本剛三：乱流モデルによる砕波点近傍の流れ場の数値計算，海岸工学論文集，第44巻，pp.101-105,1997
- 3) 辻本剛三・角野昇八・竹原幸生・山野貴司・重松孝昌：画像計測及び乱流モデルによる有孔水平板の波浪制御特性と周辺流動場の解明，海岸工学論文集，第47巻，pp.781-785，2000
- 4) J. Bear: Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier, p.181
- 5) Prinos, P., D. Sofialidis and E. Keramaris:

Turbulent flow over and within a porous bed, J. Hydraulic Engineering, Vol.129, No.9, 2003

- 6) Rodi, W.: Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review, The IAHR Monograph, Delft, The Netherlands, 1984
- 7) Antohe B.V. and J.L. Lage: A general two-equation macroscopic turbulence model for incompressible flow in porous media, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 13, pp. 3013-3024, 1997
- 8) Masuoka T. and Y. Takatsu: Turbulence model for flow through porous media, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 13, pp. 2803-2809, 1996.