

VOF-FEMモデルによる波浪場における護岸周辺地盤の動的挙動

岡山大学大学院

学生員 ○藤田 修司

中国電力(株)

正会員 坪田 裕至

岡山大学環境理工学部

正会員 前野 詩朗

1. はじめに 海岸構造物の耐波設計の際には、構造物と波との相互作用のみならず、その基礎地盤の挙動も含めて総合的な検討が不可欠となっている。しかし、波-構造物-地盤の相互作用を水理模型実験で明らかにするには多くの費用と時間が必要であり、模型の形状や境界条件の変更の度に多くの費用や労力が必要とされる。そこで本研究では、波と地盤との相互応答を解析可能なモデルを構築することを目的として、造波水槽を用いて波と護岸周辺地盤の動的挙動を実験的に検討するとともに、蔣ら(2000)と同様なVOF-FEMモデルを用いた解析を行いモデルの妥当性を検討した。

2. 実験方法 実験には、図1に示すような長さ14m、幅0.6m、高さ2.0mの造波水路を用いた。護岸部分には厚さ3cmの亚克力板を用いている。砂層構成材料には、高飽和状態の豊浦標準砂($d_{50} = 0.25\text{mm}$ 、透水係数 $k = 0.012\text{cm/s}$)を用いた。砂層部分には、間隙率0.4になるように水中自由落下させ、均質に締め固めた。また、図2に示すPt.2～9において間隙水圧を測定した。波浪条件は重複波が生じる条件とし、波高計1での波高は約45cmであり、周期は2.2秒である。

3. 解析方法 水路部の解析にVOFモデルを、地盤部の解析にFEMモデルを用い、両者の解析を地盤面で結合したVOF-FEMモデルにより解析を行った。(1)VOFモデル 波浪場の解析は、複雑な自由表面の挙動を比較的良好に再現可能なVOF法を基に開発された数値波動水路(磯部ら1999)を用いた。(2)FEMモデル 変動水圧場における護岸周辺地盤の間隙水圧と地盤の応力状態を解析するために、著者らが従来採用している有限要素法による解析方法を用いた。(3)境界の取り扱い 水路部はVOF、地盤部はFEM解析を行うが、両者の接合境界面の取り扱いが問題となる。本研究では、VOF法により水路部の計算を行い、得られた地盤面における水圧を、FEM解析を行う際の地盤表面の水圧条件とした。(4)解析条件 本研究では、表1のようなケースで水路部の解析を行い、実験結果との比較により、VOF法による解析の妥当性を検討した。ただし、解の精度を増すため、どのケースも護岸前面から10cmの距離までは $\Delta x = 2\text{cm}$ とし、地盤表面に接する部分については $\Delta z = 2.5\text{cm}$ とした。

4. 結果および考察 (1)実験結果の概要 図3は、実験で得られた、護岸前面から10cmおよび1.0m離れた観測点における水位および地盤面から5cm離れた点の水圧変動を示している。波高計1では約45cm程度の水位変動が生じており、Pt.9の水圧変動は、波の谷の時には水位変化とほぼ同程度の水圧変化を示しているが、波の峰の時には水圧はかなり減衰することがわかる。水位変化との位相の遅れは殆ど見られない。波高計2の水圧変動は、波の峰の時には2カ所ピークが生じている。Pt.10の水圧変動は、波の峰の時には振幅減衰が少なく、逆に波の谷の時には振幅減衰が大きくなっている。また、波高計1の水位変動よりも位相が遅れている。

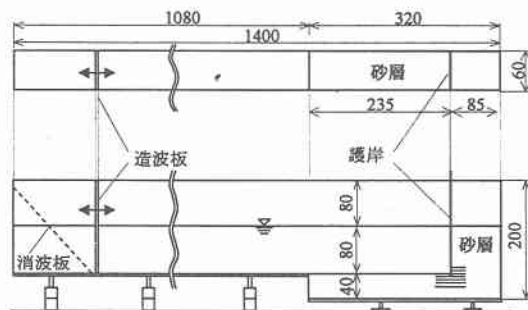


図1 造波水路 (単位: cm)

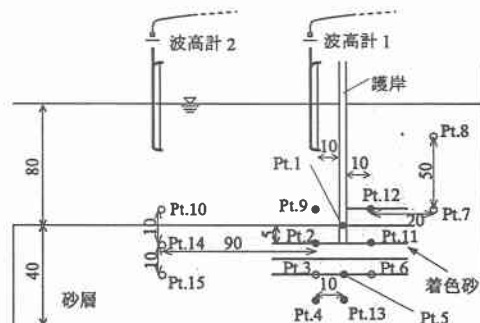


図2 計測位置 (単位: cm)

表1 VOF法の解析条件

Case	格子間隔 (cm)	動粘性係数 (m^2/s)
1	$\Delta x = 5.0, \Delta z = 5.0$	1.0×10^{-6}
2	$\Delta x = 5.0, \Delta z = 5.0$	1.0×10^{-4}
3	$\Delta x = 5.0, \Delta z = 5.0$	$k-\varepsilon$ モデル
4	$\Delta x = 2.0, \Delta z = 5.0$	1.0×10^{-6}
5	$\Delta x = 2.0, \Delta z = 5.0$	1.0×10^{-4}
6	$\Delta x = 2.0, \Delta z = 5.0$	$k-\varepsilon$ モデル

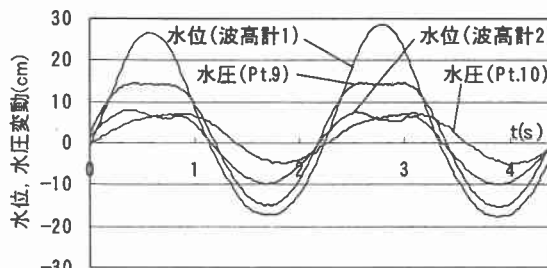


図3 水位、水圧変動 (実験結果)

るのがわかる。図4は、護岸周辺地盤の変動間隙水圧分布を示している。この図より、護岸周辺地盤に作用した変動水圧は、地盤内へ振幅減衰および位相の遅れを伴いながら伝播していることがわかる。本実験では、護岸周辺地盤の流動は殆ど生じなかった。これは、護岸前面地盤上に作用する水圧振幅が小さかったことが原因であると考えられる。(2)波浪場の再現性の検討 波高については、どのケースもほぼ実験値を再現できていた。しかし、Pt. 9の水圧の変化については、実験値よりも小さくなる傾向がある。格子間隔 Δx が2cmの方が実験値の再現性は若干良くなる。動粘性係数については、本研究では波が重複波であったため、その影響は殆ど現れなかった。解析条件の違いにより、波浪場の再現性は若干変化するが、いずれのケースも実用的なレベルで波浪場が再現できていた。格子間隔を小さくすると、解析値の精度は上がることがわかったが、本研究では、計算時間やメモリの制約等を考慮して、以後においてはCase2の計算条件を用いて解析した。図5は、Scale1モデル（実験と同じスケール）の水位、水圧変動について、図3と同じ測点について図示したものである。これらの図より、波高計1の地点の水位変動とPt. 9の水圧変動については、実験結果を良く再現できていることがわかる。波高計2の地点の水位変動を見ると、波のピークが二つある点なども良く一致している。しかし、Pt. 9の水圧変動については、実験値で見られた位相の遅れが殆ど発生していない。(3)VOF-FEMモデルによる護岸周辺地盤の動的挙動の検討 図6は、Scale1モデルによる護岸周辺地盤の変動間隙水圧を示している。この図と図4を比較すると、解析ではPt. 9の水圧振幅が実験値よりやや小さいために、間隙水圧振幅の解析値も小さくなっていることがわかる。しかし、護岸前面地盤上に作用する変動水圧が、護岸を回り込むように振幅減衰および位相の遅れを伴いながら伝播する様子が良く再現されている。このことより、本モデルにより、波浪場における護岸周辺地盤の動的挙動を取り扱うことが可能であることがわかる。図7と図8は、Scale1モデルについて、護岸前面に波の峰と波の谷がさしかかった時の水路部の流速分布および地盤内の浸透力、等間隙水圧分布を示している。これら図より、護岸前面が波の峰の時と、波の谷の時では、浸透力の向きが逆になることがとかる。とくに、波の谷の時には、護岸裏込め土砂が護岸前面へ流出する方向に作用することがわかる。また、護岸周辺部の間隙水圧分布に影響を与える範囲は、護岸前面からわずかな距離の範囲に限られている。さらに、波の節では浸透力の向きは、ほぼ横向きとなり、波の腹では浸透力は、上下方向を向いていることがわかる。

5. 結論 本研究では、波浪場における護岸周辺地盤の動的挙動を実験的に検討するとともに、実験結果との比較により、VOF-FEMモデルの適用性を検討した。その結果、波浪場における護岸周辺地盤の動的挙動が明らかにされた。また、本研究のVOF-FEMモデルは、波と地盤の動的挙動が解析可能であることが示され、実験では再現不可能な実スケールの現象を取り扱うのに有効な手段となりうることが明らかにされた。

参考文献 磯部雅彦・余 錫平・梅村幸一郎・高橋重雄(1999): 数値波動水路の開発に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 36-40. 蔣 勤・高橋重雄・村西佳美・磯部雅彦(2000): 波・地盤・構造物の相互作用に関するVOF-FEM予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 51-55.

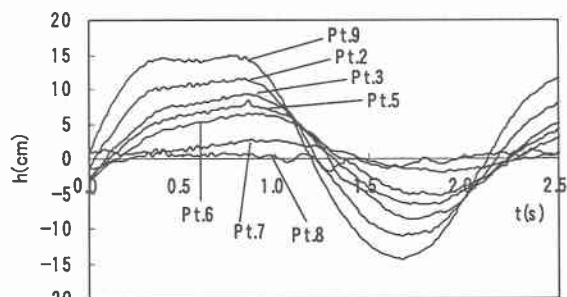


図4 変動間隙水圧（実験結果）

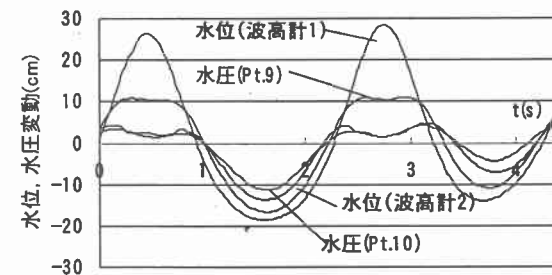


図5 水位、水圧変動（解析結果Case2）

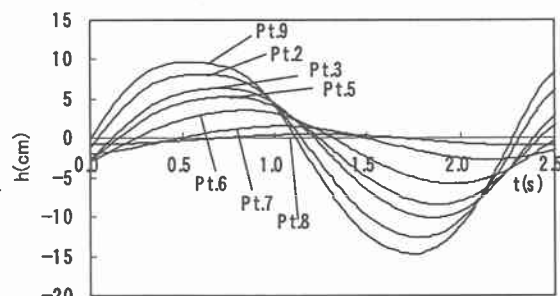
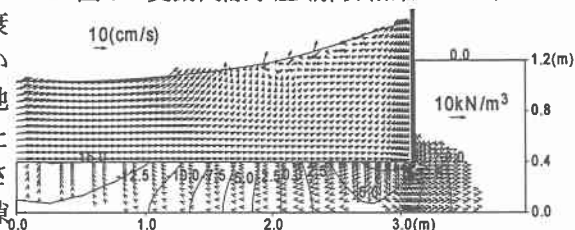
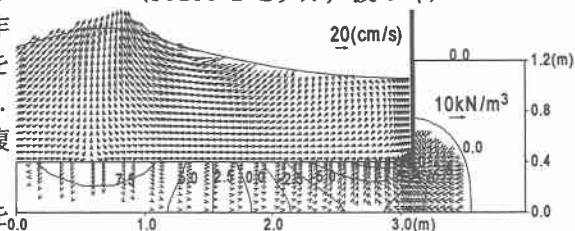


図6 変動間隙水圧（解析結果Case2）

図7 流速、浸透力、等間隙水圧分布
(Scale 1モデル、波の峰)図8 流速、浸透力、等間隙水圧分布
(Scale 1モデル、波の谷)