

波一混成堤—地盤系の相互応答に関する研究

前野 詩朗*・Lechoslaw G. Bierawski**・小川 誠***

本研究は、波—地盤—構造物系の相互応答特性を明らかにするための基礎として、混成堤を対象として、波による水面変化、流速場、捨石部の間隙水圧、海底砂地盤の間隙水圧を多点計測し、時々刻々と変化する波—混成堤—海底地盤の挙動を明らかにすることにより、今後の精度良い数値モデルの構築に役立てるものである。実験結果より、防波堤周辺の波高や流速分布の示す傾向と捨石マウンド部の間隙水圧分布特性を明らかにするとともに、透過性を有する捨石部分が混成堤近傍の流速分布に与える影響などを明らかにした。さらに、VOF-FEM 法による解析を行い、数値解析モデルを波—地盤—構造物系の相互応答の解明に適用することの有効性を示した。

1. はじめに

海岸構造物は台風や冬季風浪などによる自然の脅威から我々の生活基盤を守るために大変重要である。しかし、明石の大蔵海岸で発生した人工海浜の陥没事故のように、波が海岸構造物周辺地盤に作用することによる被災はこれまでの設計基準では防ぎきれない場合もある。現地における波—地盤—構造物系の相互応答特性をあらかじめ知ることができれば海岸構造物周辺地盤の安定性も構造物設計に含めることができる。このための手段として模型実験なども行われているが、多大な労力と費用を要するため、数値解析的に求める手法が盛んに行われている。しかし、例えば、混成堤の数値解析モデルの妥当性を検証するためには、波と捨石マウンドさらには地盤も含めた挙動を同時に検証する必要がある。これまでの研究ではこれら全てを計測し、その様子を明らかにした研究は殆ど見られない。本研究は、図—1 に示す混成堤模型を用いて波による水面変化、流速場、捨石部の間隙水圧、海底砂地盤の間隙水圧を多点計測し、時々刻々と変化する波—混成堤—海底地盤の挙動を明らかにすることにより、今後の精度良い数値モデルの構築に役立てるものである。さらに、代表的なケースについて VOF-FEM 法による数値シミュレーションも併せて行い、解析モデルの妥当性を検証した。

2. 実験方法および解析方法

(1) 実験方法

実験には二次元造波水路を用い、水路内にサンドプールを設け、その上に混成堤模型を設置する。混成堤前面に重複波を作用させたときの図—1 の測定位置における各種物理量を多点計測した。なお、図中の目盛の原点はサンドプールの沖側表面端であり、サンドプールの深さは 40 cm である。また、波圧および揚圧力の算出には混

成堤直立部に設置した測定ポイントでの水圧を用いた。実験のケースは水位および捨石粒径の違いで分け、水位は、70 cm, 60 cm, 50 cm の 3 ケース、捨石粒径は 4.2 cm (間隙率 0.38), 1.5 cm (間隙率 0.39) の 2 ケースを用い、これらを組み合わせている。周期はいずれの水位においても約 2.0 秒であるが、波高は水位が高くなるほど大きくしている。

(2) 解析方法

本研究では、水路部および捨石部の解析に VOF モデルを用い、さらに地盤部の解析に 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。この解析方法は磯部ら (1999) や蔣ら (2000) が提案したものであり、前野ら (2001) や Maeno ら (2002) が鉛直護岸前面の波と周辺地盤の挙動を解析する際に適用し妥当性を確かめている。解析で用いた基礎式および VOF モデルと FEM モデルの境界の取り扱いについては前野ら (2001) と同様な取扱いであり、本論文では紙面の都合上省略する。なお、地盤部およびマウンド部の解析には以下の解析条件を用いた。

$$G = 3.45 \times 10^7 \text{ (N/m}^2\text{)}, \beta = 4.3 \times 10^{-10} \text{ (m}^2\text{/N)},$$

$$k = 0.12 \text{ (cm/s)}, \lambda_a = 0.003, \lambda_w = 0.40, \nu = 0.45,$$

$$C_M = 1.5, C_D = 0.9$$

ここに、 G :せん断弾性係数、 β :水の圧縮率、 k :透水係数、 λ_w, λ_a :水および空気体積含有率、 ν :ポアソン比、 C_M, C_D :VOF 法で用いた捨石部の慣性力係数および抵抗係数である。

3. 実験結果および考察

(1) 波高の伝達率

図—2 は波高算出に用いた時間帯 (表示は一部) の水位変動波形 (港外側) であり、ケースごとに波の始点として、平均水面より水位が上昇する時点を時間軸の 0 としている。捨石粒径が小さい場合 (粒径 1.5 cm) には捨石マウンド部の透水性が小さいため反射が大きくなり、防波堤前面の波高がやや大きくなり、逆に港内側の波高は小さくなる。

* 正 会 員 工 博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科

** 工 修 岡山大学大学院自然科学研究科博士後期課程

*** 学生会員 岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程

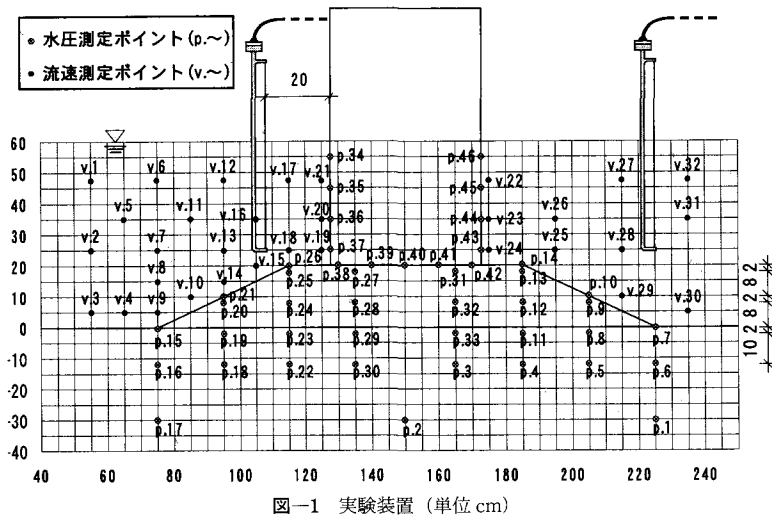


図-1 実験装置 (単位 cm)

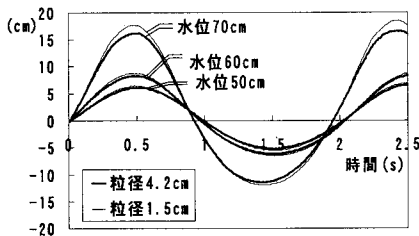


図-2 港外側の水位変動波形

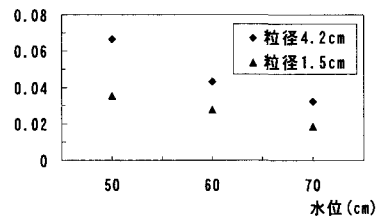


図-3 波高の伝達率

図-3 は図-2 の時間帯を含む 3 波長分の平均波高の伝達率である。粒径が小さくなるとマウンド部の透水性が小さくなり伝達率が小さくなるのは上述のとおりであるが、水位が低下するほど捨石部の影響が強くなるため、粒径の違いによる伝達率の差が大きくなる。

(2) 波圧および揚圧力

図-4 は直立部前面に作用する波圧分布である。図には測定値とともに混成堤を設計する際の波力の算定基準として採用されている合田式（港湾の施設の技術上の規準・同解説、1979）による波圧も表示している。合田式における設計波高は、実験で発生させた波が重複波であり、防波堤前面において碎波が生じていなかったことから、防波堤前面に設置した波高計で計測した波高を与えている。波圧分布は、水位 50 cm では合田式と同様な直線的な分布となるが、水位が高いケースほど直線的でなくなる。水圧測定装置の都合上、測定点は常に水中になくなくてはならなかったため、静水面付近の測定ができなかった。このため、静水面位置の波圧の値を静水面位置に近い 2 つの測定点 (p.34, p.35) の値を結んだ直線の延長により表している。分布の傾向を考えると、水位の高い図-4(a) のケースでは静水面付近の波圧を実際よりも小さく表示している可能性がある。いずれのケース

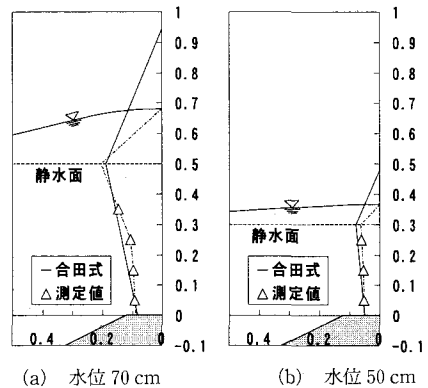


図-4 波圧分布 (捨石粒径 1.5 cm, 単位 cm)

についても捨石粒径による違いは殆ど見られなかった。

図-5 は直立部底面に作用する揚圧力分布である。揚圧力分布は合田式と同様に直線的な分布となる。初期水位が異なるケースは図に掲載していないが水位が低くなるほど捨石部の透水性の影響が強くなる。粒径が大きい場合には図からもわかるように、右端の測定点である p.42 では、水位変動が小さかったにもかかわらず捨石粒径 4.2 cm のケースの方が捨石粒径 1.5 cm のケースよりも大きな揚圧力が作用する。また、粒径が大きくなると直

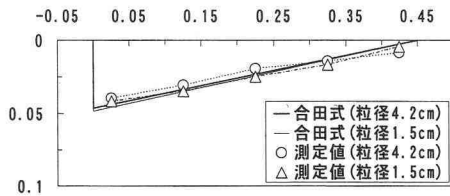


図-5 揚圧力分布 (水位 50 cm, 単位 cm)

立部後面下端部で合田式と比べ大きな揚圧力が作用する。透過波の影響により後面下端部における揚圧力が必ずしもゼロにならないことは、水谷ら (1997) の解析結果にも示されている。

(3) 間隙水圧および流速分布

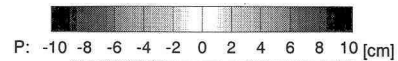
図-6 は捨石粒径の違いによる間隙水圧分布 (峰の時) の比較である。間隙水圧の伝播に関しては、殆どの箇所に変動の位相および振幅の差はあまり無かったが、水位変動の大きい防波堤前面の捨石部法肩付近で間隙水圧の大きさに違いが現れている。粒径が小さい場合 (図-6 (b)) では、法肩付近で等間隙水圧線が密になっており、浸透流の増大がみこまれる。粒径が小さくなるとマウンド部の石礫の重量が小さくなるため法肩部の石礫が破壊し易くなると考えられる。

図-7 は間隙水圧および流速分布の時間変化である。表示している時間は図-2 の時間軸と同一である。実験装置の精度上、ある程度以下の大きさの流速は計測が難しく、測定波形に乱れが生じる。流速が非常に小さいところではこの影響を受けていると思われる。港外側の流速分布は水位が平均水面を上下する時間帯で大きくなり、水位変動の峰および谷の時に小さくなる。水位が上昇して平均水面を切る時刻と下降して切る時刻の港外側の流速分布は、流向とその大きさは若干異なるもののほぼ対称である。

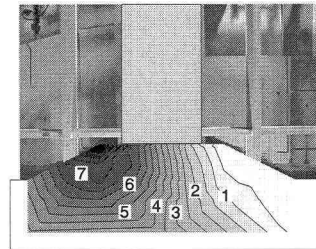
図-9 は一周期分の流速の変化を重ね合わせて示している。この図より、防波堤から離れた測点 (v.1, v.2, v.5, v.6) では、速度ベクトルの方向は 8 の字を描くように変化することがわかった。また、堤防およびマウンド部に近づくとき徐々に扁平な 8 の字形になる。しかし、混成堤前面下端部の測点 v.19 では、8 の字ではなく、時計回りの楕円形になる。

図-11 は混成堤前面近傍の流速分布である。この図より、波の峰 ($t=0.46$ s) と谷 ($t=1.50$ s) では流速は殆どなくなるが、混成堤前面下端部測点 v.19 ではこの時間帯においても流速がゼロにならないことがわかる。

図-13 は波の峰がさしかかった時の混成堤下部の流速と等間隙水圧の状況を示している。この図の直立部と捨石部との境界付近の点 (v.19: 港外側, v.24: 港内側) の流速分布より、港外側の流速が小さくなる波の峰の時



(a) 粒径 4.2 cm



(b) 粒径 1.5 cm

図-6 間隙水圧分布 (水位 70 cm)

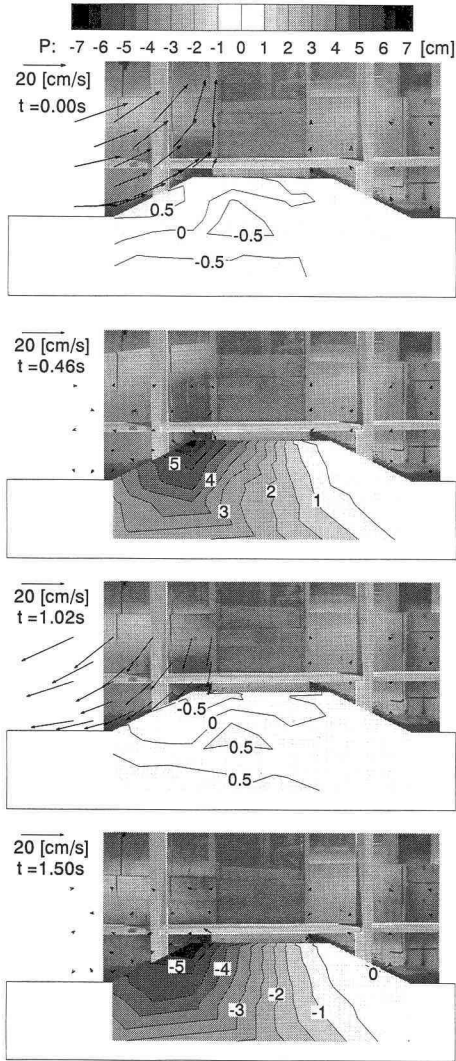
に、港外側から港内側への捨石部を通過する流れの存在が認められる。一方、波の谷の時には港内側から港外側への逆の流れの存在が認められた。この流れの存在が、混成堤における捨石マウンドの透水性の影響を顕著に表していると言え、図-7 や図-11 で示される流速分布の特徴を規定する要因である。

4. 解析結果および考察

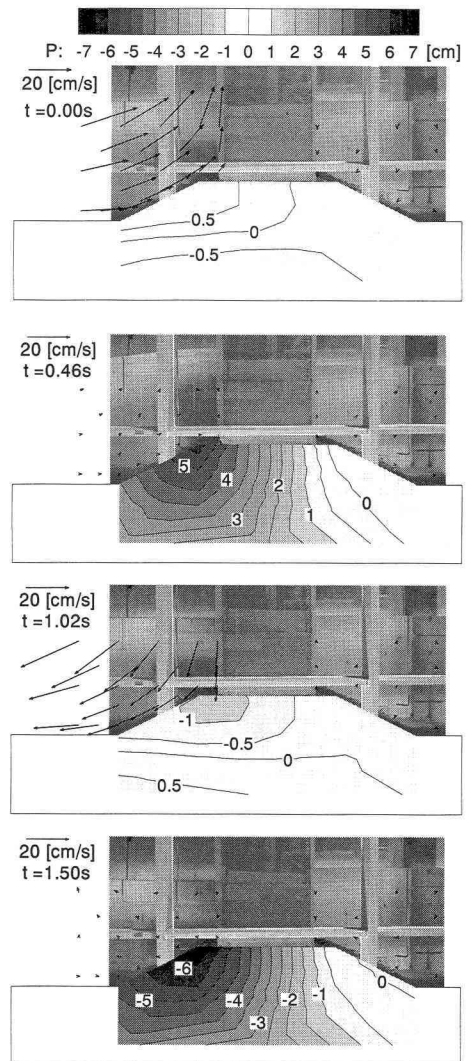
図-8, 10, 12, 14 は VOF-FEM モデルによる解析結果であり、実験結果である図-7, 9, 11, 13 に対応した間隙水圧および流速分布の時間変化である。解析結果として用いたデータは水位変動が実験結果とよく一致している時間帯のデータを用いている。

図-8 より、解析結果における間隙水圧分布は、実験結果と比較すると等間隙水圧線の形状が滑らかであり、また、多少伝播の大きさの異なる箇所もあるものの、比較的よく実験結果を再現できることがわかる。表示した各図の時間は図-7 にあわせてあるが、時間的な変化もよく一致しており、変動の峰となる時間、谷となる時間ともに実験とはほぼ一致していた。

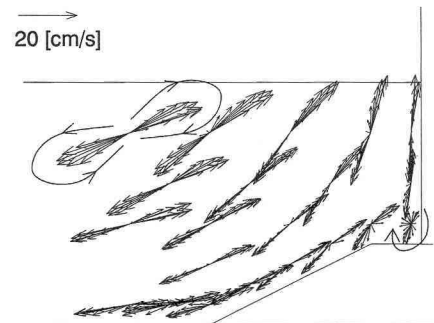
図-8 の流速分布に関して見ると、平均水面を波が上下し、流速が大きくなる時間帯においては、大きさ、流向ともに実験結果とよく一致することがわかる。一方、波の峰と谷の流速が小さくなる時間帯においては、流向が実験結果と異なっている点もあるが、概ね実験値を再



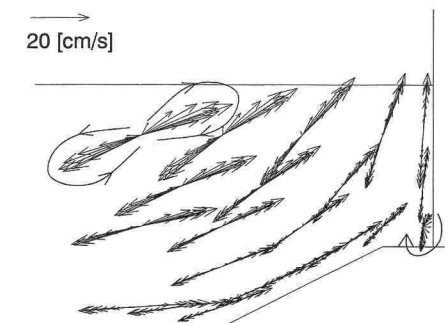
図—7 間隙水圧および流速分布(実験結果, 水位 60 cm, 捨石粒径 1.5 cm)



図—8 間隙水圧および流速分布(解析結果, 水位 60 cm)



図—9 混成堤前面の流速の変化(実験結果, 水位 60 cm, 捨石粒径 1.5 cm)



図—10 混成堤前面の流速の変化(解析結果, 水位 60 cm)

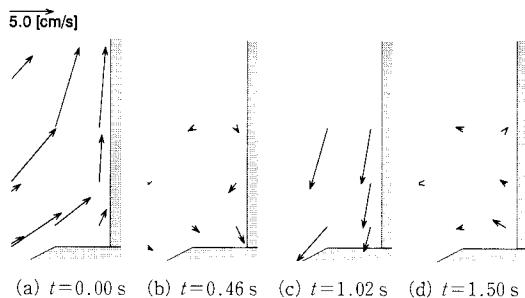


図-11 混成堤前面下端付近の流速分布 (実験結果, 水位 60 cm, 捨石粒径 1.5 cm)

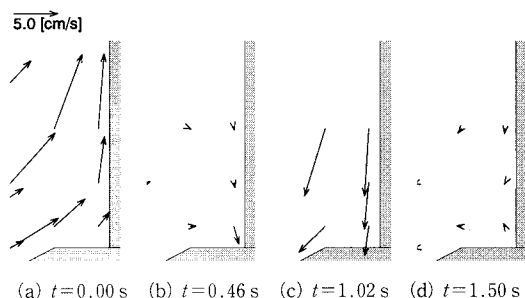


図-12 混成堤前面下端付近の流速分布 (解析結果, 水位 60 cm)



図-13 混成堤下部の状況 ($t=0.46$ s) (実験結果, 水位 60 cm, 捨石粒径 1.5 cm)

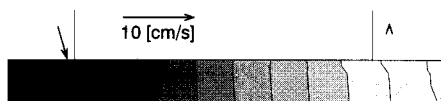


図-14 混成堤下部の状況 ($t=0.46$ s) (解析結果, 水位 60 cm)

現できている。図-10より、波の一周期間の速度ベクトルの方向の変化を見ると、構造物から離れると8の字を描くように変化し、構造物に近づくほど扁平な8の字形となる傾向が認められ、実験結果とよく一致している。また、混成堤前面下端部測点 v.19 において時計回りの楕円形状になることに関しても実験値を再現できている。また、図-12, 14より、v.19, v.24の流速分布は実験で観測された捨石部を透過する流れが再現されている。

5. 結 論

本研究では、波による混成堤および周辺部の動的挙動を実験的に検討すると共に、VOF-FEMモデルによる数値計算による現象の再現を試みた。その結果、本研究で用いた解析モデルは実験結果をよく再現しており、混成堤周りの動的挙動の解析が可能であることが確認された。しかし、VOFモデルについては、捨石部における慣性力係数および抵抗係数の設定の際に、捨石の形状や粒径を変えた場合の各係数の値が確立されておらず、捨石部の特性を表現しにくい状況となっている。本研究では一般的な値を用いて数値解析を行ったが、今後は、多孔

質乱流の抵抗則を透水係数の関数で表現できる式を導入するなどの改良を加えて、より精度よいモデルの開発を進める必要がある。

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.
- 運輸省港湾局監修 (1979): 港湾の施設の技術上の規程・同解説, pp. 2-106-2-108.
- 前野詩朗・藤田修司 (2001): 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の検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 971-975.
- 水谷法美・Ayman M. Mostafa (1997): 波の非線形を考慮した混成堤基礎地盤の波浪応答に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 926-930.
- Maeno, S., L. G., Bierawski and S., Maeno (2002): A Study on dynamic behavior of the seabed around a seawall under wave motion Using the VOF-FEM Model, Proceedings of the 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 3, pp. 579-603.