

波浪による構造物の運動を考慮した地盤内間隙水圧の 波浪応答に関する数値計算

高山 知 司* ・ 辻尾大樹** ・ 安田誠宏***
谷口昇太郎**** ・ 高橋重雄***** ・ 水谷雅裕*****

実海域における海底地盤表層の動態については、未だ不明な点が多い。著者らは、水深15 mの観測サイトにおいて、2003年と2004年に防波堤基礎地盤内における間隙水圧の応答観測を実施してきたが、構造物下地盤において鉛直方向の観測深度の違いによって間隙水圧に位相差が生じるといったような原因の不明な特性を確認した。本研究は、VOF-FEM法による間隙水圧の数値計算によって、観測結果で得られた特性を明らかにし、高波浪時の地盤内間隙水圧の波浪応答を解明するものである。

1. はじめに

海岸構造物が暴波来襲時に支持地盤内に沈み込む被害が顕在化しており、その原因の一つとして波浪による地盤の液状化が考えられている。一般的に波浪による地盤の液状化には2種類あり、変動間隙水圧により波の谷付近で生じる液状化(峰では安定化)と、残留間隙水圧が蓄積することによって生じる液状化である。波浪による地盤液状化のメカニズムを解明するためには、地盤内間隙水圧の波浪応答特性を明らかにすることが極めて重要である。

規則波浪による地盤液状化のメカニズムについては、実験や理論による研究が進められている(Sassa・Sekiguchi, 1999)が、不規則な波群を何度も受けるような、実際の高波浪作用下における海底地盤表層の動態については不明な点が多い。また、波浪と構造物の相互作用のみならず、構造物直下の基礎地盤を含めた総合的な検討として、これまでに多くの水理模型実験がなされている(鈴木・高橋, 1998; 鈴木ら, 2003)。しかし、こうした水理実験では、その適応性に限界があるため、波浪と構造物、地盤の相互作用を検討する数値計算法が開発されている。その中でも、蔣ら(2000)は、波浪場を碎波等を含んだ非線形性を考慮できるVOF法で解析し、それに伴う構造物と地盤の応答をFEM法で計算する非線形数値計算法(VOF-FEMプログラム)を開発している。また、高橋ら(2002)は蔣ら(2000)の数値計算プログラムを改良している。

本研究は、高知港東第一防波堤において、2003年およ

び2004年に実施した、自由地盤と防波堤直下地盤(法先自由地盤、洗掘防止工下、消波ブロック下、ケーソン直下)における水圧と間隙水圧の現地観測によって得られた結果(高山ら, 2004, 2005)と、VOF-FEM法による間隙水圧の数値計算によって得られた結果を比較することにより、高波浪時における地盤内間隙水圧の波浪応答を明らかにするものである。

2. 間隙水圧の波浪応答に関する数値計算の概要

本研究では、間隙水圧の波浪応答を計算するために、高橋ら(2002)によって提案されたVOF-FEMプログラム(CADMAS GEO-SURF)を用いている。本プログラムは流体部と地盤部の解析モデルで構成されており、流体部をVOF法からなる数値波動水路(磯辺ら, 1999)で解析し、地盤部をBiotの2相弾性体理論に基づく弾性FEMプログラムで解析している。

(1) 基礎方程式

流体部には、碎波や越波等の非線形波動現象を数値的に扱えるように、複雑な自由表面を解析可能なVOF法からなる数値波動水路を用いている。数値波動水路では、2次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式とNavier-Stokes方程式を用いており、これを多孔質体中流れに拡張したものを支配方程式としている。

地盤部については、Biotの2相弾性体理論に基づいてモデル化を行っている。間隙水には海底地盤に気泡が混入したことを考慮して圧縮性流体としている。また、砂粒子と間隙水の運動方程式を定式化する際、間隙水の加速度項を無視し、土粒子の変位 U と間隙水圧 π を従属変数とする $U-\pi$ formを採用しており、 $U-\pi$ form定式化の有限要素法による数値計算モデルである。

(2) 流体部と地盤部の連成方法

本モデルは、流体部から求めた境界の水圧を地盤部の境界値に接続し、地盤部で計算された境界流速を流体部の境界値に接続する弱連成の形式を採っている。また、流体部と地盤部の時間刻み幅 Δt は同一であるが、流体

* フェロー 工博 京都大学教授防災研究所
** 正 会 員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株)
*** 正 会 員 博(工) (I) 京都大学助手防災研究所
**** 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
***** 正 会 員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所研究主監
***** 正 会 員 工修 国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所所長

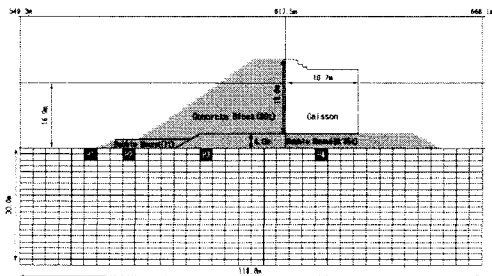
部から地盤部へ、地盤部から流体部へ接続する際、 $\Delta t/2$ ずつずらしながら交互に解いている。具体的には、流体部で時刻 $t+\Delta t$ の計算で得られた境界値を時刻 t の境界値と平均し、時刻 $t+\Delta t/2$ の境界値として地盤部へ接続するという接続方法を採用している。

(3) 計算方法

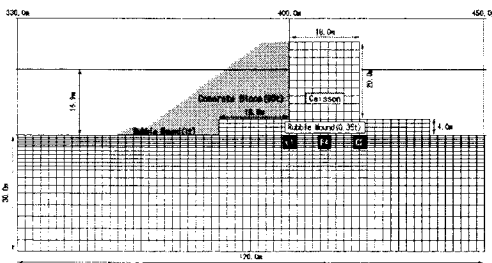
本研究では、2種類の計算方法を設定している。一つは、地盤表面にかかる外力として波浪による水圧荷重のみを考慮する波浪負荷モードと、もう一つは波浪によって引き起こされる構造物(ケーソンや捨石マウンド)の運動も考慮するケーソン運動モードである(図-1)。

波浪負荷モードでは、ケーソンは不透水性の動かない障害物とした。また、捨石マウンドとグラベルマットには0.44、消波ブロックには0.5の透過率をそれぞれ与えた透水性多孔質体としており、ケーソンと同様に運動は考慮していない。

一方、ケーソン運動モードでは、ケーソンについては、不透水で剛性の高い地盤として、地盤部のFEMモデルで解析し、その際ケーソン前面にかかる波力によるケーソンの運動を考慮した。捨石マウンドについては透水性が高く、剛性の低い地盤として扱い、ケーソン同様、地盤部のFEMモデルで解析した。ケーソンの運動にともなうマウンドの動的変形や捨石マウンドに直接かかる水圧荷重による変形についても考慮した。また、グラベルマットと消波ブロックについては波浪負荷モードと同様に設定した。



(a) 波浪負荷モード



(b) ケーソン運動モード

図-1 計算モード

3. 計算結果と考察

本研究では、高知港東第一防波堤において、2003年と2004年に実施した現地観測結果(高山ら, 2004, 2005)から得られた地盤内間隙水圧の特性(重複波モード特性と振幅振幅水平方向比特性、位相変化特性)について、観測と計算の結果と比較を行っている。

波浪条件としては、①波高2.0m、周期8s(H2T8)、②波高6.0m、周期12s(H6T12)、③波高6.0m周期16s(H6T16)の3ケースで数値計算を行った。

(1) 波浪負荷モード

波浪負荷モードの計算では、現地観測によって得られた重複波モード特性、振幅振幅水平方向比特性について現地観測結果と比較した。

ケーソン式混成堤のような前面に構造物が存在しない防波堤の重複波モードは、常にケーソン前面を重複波の腹とし、節は来襲波浪の波長によって変化する。しかし、ケーソン前面に消波ブロック等の構造物があり、そのためにケーソン前面に勾配が存在する場合、来襲波高や水位によって入射波の反射位置が変化する。

波浪負荷モードを用いて、① H2T8、② H6T12、③ H6T16の計算条件の下に行った計算結果を図-2に示す。縦軸に法先自由地盤(P1)の水圧振動振幅に対する各地点の水圧振動振幅の比をとり、横軸は各地点の水平方向位置を示している。

図から① H2T8の条件で波浪を作用させた場合、各地点より P1地点の振幅が大きくなり、P3、P4地点の振幅比がそれぞれ0.6、0.2と非常に小さいことがわかる。これは入射した波が防波堤前面のコンクリートブロックによって消波されて、ケーソン前面では波高が減少していることを表している。このことから、計算条件①での防波堤前面では、重複波は発生していないと考えられる。また、② H6T12の条件では、各地点の振幅比は P2で1.06、P3で1.52、P4で0.5を示し、計算条件①とは異なり P3の値がかなり大きくなった。このことから、計算条件②では防波堤前面の重複波モードは P3地点付近を重複波の腹とし、P1地点付近を重複波の節とする変動

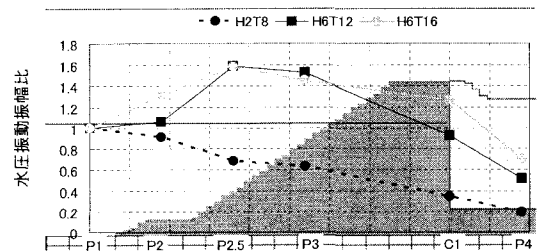


図-2 重複波モード(波浪負荷モード)

モードであることが確認される。消波ブロックがなければケーソン前面壁が重複波の腹となるが、消波ブロックによってエネルギーが逸散されるためにP3が重複波の腹になったと考える。③ H6T16の計算条件下では、計算条件②の場合とほぼ同様であるが、入射波浪の周期が長いために消波ブロックによってあまり消波されず、ケーソン前面での振幅比は計算条件②の0.9よりも大きい1.28を示した。しかし、重複波モードとしては計算条件②と③ではP3地点付近を重複波の腹とし、P1地点を重複波の節として変動している点で概ね等しい。

当観測サイトにおける高波浪来襲時の波浪特性は計算条件② H6T12と③ H6T16に該当し、波高減少過程では波高減少にともない徐々に周期も短くなり、計算条件① H2T8程度の波浪となる。したがって、当観測サイトでは、高波浪来襲時にはP3地点付近を重複波の腹とし、P1地点付近を節とする変動モードであり、波高が減少した後は入射波が消波ブロックによってエネルギーを逸散し、ケーソン前面で波高が低下する傾向を示す。このことは、観測結果とも一致しており、本モデルによって観測結果が再現できたといえる。

次に、振動振幅水平方向比について調べるため、波浪負荷モードを用いて条件①～③の下で行った計算結果について述べる。間隙水圧振動振幅に関して、P1地点の値に対するP2～P4地点の値の比を表す振動振幅の水平方向比の計算結果を図-3に示す。図は、P2～P4地点の地盤内-0.75 mでの計算結果と-0.6 mでの観測結果を比較している。図からP2～P4地点は周期8 s程度で1.0(P1地点の振幅)より小さい値をとっており、逆に周期12 s～16 sでは1.0(P1地点の振幅)よりも大きな値をとっていることが分かる。これを見ても、周期8 sと周期12～16 sで起こる防波堤前面の波高変化を精度よく再現していることがわかる。

しかしながら、ここには示していないがP3地点-2.25 mに関しては、重複波モードの腹に位置する周期12～16 sでは観測結果を再現できなかった。これは、間隙比や透水係数、地盤のせん断弾性係数等の地盤パラメータを全地盤領域において一定として計算しており、現地における締め固めの影響等を考慮できていないためと考えている。

(2) ケーソン運動モード

ケーソン運動モードの計算では、現地観測結果に見られた構造物下地盤中における位相のずれを含む間隙水圧変動特性について比較を行った。なお、消波ブロック下地盤(P3地点)における消波ブロックの不規則な沈下の間隙水圧変動に対する影響を数値計算で再現することは非常に困難なため、本研究では、ケーソン直下地盤(P4地点)におけるケーソン運動による間隙水圧変動につい

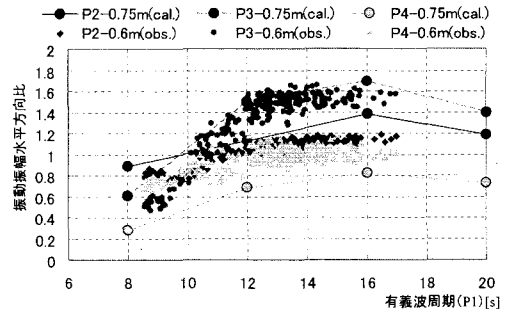


図-3 周期に対する振動振幅水平方向比の計算結果と台風0416号の観測結果との比較

て調べてみた。その際、ケーソン中央部下地盤をP4地点としているのは現地観測と同じであるが、さらにケーソン沖側端のC1地点とケーソン岸側端のC2地点についても解析した。

C1地点では、波浪によって一定以上の(ケーソンの抵抗力よりも大きい)波力がケーソン前面に作用したとき、ケーソンは底面のある点を中心に回転モーメントを受けて岸側に傾き、ケーソン下端は鉛直上方に変位する。この鉛直変位を図-4～6では u_y で表しており、上方向の変位を正にとっている。その影響でC1地点近傍では、もともとケーソンが存在していた場所に空間ができ、その空間に間隙水が流れ込み、周辺地盤中の間隙水圧は減少する。したがって、過剰に発生していた間隙水圧は減少し、負に発生していた間隙水圧はさらに減少する。しかし、ケーソンに大きなモーメントが作用するのは波の峰付近がケーソン前面に達したときであり、その時に水圧から動員される変動水圧も大きくなる。したがって、水圧から受け取って地盤表層部に発生する間隙水圧は大きくなる。C1地点では、水圧から受け取って地盤中を伝わるものと、ケーソンの変位によって減少するものとが相殺された間隙水圧が発生している。

C1地点におけるケーソン運動モードでの計算結果を図-4に示す。図は、波浪条件 H6T12の計算結果であり、C1地点における4深度の間隙水圧変動とケーソンの鉛直方向変位(上方を正)を示している。図に示すように、-0.25 mの地点ではケーソン変位とほぼ同様に変動しているが、これは、ケーソンが最も正方に変位する波の峰時に地表面の水圧も最も大きくなるので、非常に高い正の相関で変動している。しかし、深くなるにしたがってケーソン変位や-0.25 mの間隙水圧変動との相関は悪くなり、-0.75 m以深の間隙水圧が単なる水圧伝播による変動以外にケーソン変位の影響によって変動していることがわかる。また、-2.25 mでは-0.25 mとほぼ逆位相になっており、-2.25 mの間隙水圧変動は水圧伝播による変動よりケーソン変位による変動の影響が上回ってい

ることがわかる。

C2地点では、波力がケーソン前面に作用し、ケーソンが回転モーメントを受けて傾くと、ケーソン沖側端とは違い、ケーソン下端は鉛直下方に変位する。その変位によってC2地点下の地盤は、間隙を圧縮させる応力が働き、間隙を減少させようとする。しかし、間隙水の変位がその骨格変位よりも遅くなるので間隙には過剰に間隙水圧が発生する。ケーソンが大きな波力を受けて大きく傾くのはケーソンに波の峰付近が作用したときで、その時C2地点においても間隙水圧は過剰に発生している。C2地点では、水圧から受け取って間隙を伝わってくるものとケーソン変位によって発生したものとを併せた間隙水圧が発生している。

C2地点におけるケーソン運動モードでの計算結果を図-5に示す。図は、波浪条件H6T12でのC2地点における4深度の間隙水圧変動とケーソンの鉛直方向変位(上方を正)を示している。全深度ともケーソンの変位の影響を大きく受けて変動しているが、 -0.25 m の間隙水圧よりも -2.25 m の間隙水圧の方が大きく変動している。これは、ケーソン運動モードではマウンドを実際より透水性の低い地盤として取り扱っているため、波浪負荷モードよりもマウンド内を伝わる間隙水圧の減衰が大きくなってしまい、水圧から伝わる間隙水圧変動よりもケーソン運動にともなう地盤骨格変位によって生じる間隙水圧変動の方が影響が大きくなっているものと考えられる。ここで、 -0.75 m よりも -2.25 m の間隙水圧変動振幅が大きくなっているのは、地盤の表層部は比較的透水性の高いマウンドに接しており、骨格変形によって生じた間隙水圧が容易にマウンドへ移動できるためである。また、地盤の骨格変位の影響についても水圧による間隙水圧の伝播と同様で、地盤内深さが増すとその影響は小さくなる。したがって、間隙水圧の変動振幅は深さ -2.25 m 付近でピークになっていたと思われる。

P4地点では、C1地点やC2地点のようにケーソンの変位は顕著に起きない。実際、ケーソンが中央部を中心にモーメントを受けると、ケーソン底面中央部は変位せず、C1、C2地点のみ符号が異なって上下に変位する。しかし、計算結果によると大きな波力のかかるC1地点の方が、C2地点よりも大きく変位していることから、回転モーメントの中心はケーソン中心から岸側の底面にあることがわかる。

P4地点における、ケーソン運動モードでの計算結果を図-6に示す。図は、波浪条件H2T8の下でのP4地点における4深度の間隙水圧変動とケーソンの鉛直方向変位(上方を正)を示している。図より、地盤内深さが増すにつれて間隙水圧の振幅が減少し、位相差を生じていることがわかる。これは、間隙水圧変動がケーソンの変位

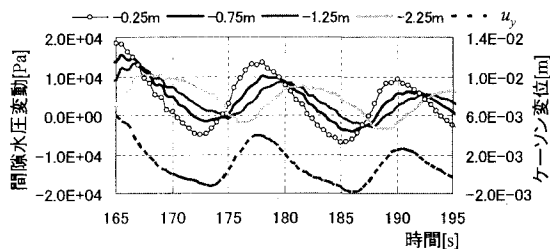


図-4 H6T12条件下でのケーソン変位とC1地点の間隙水圧変動(30秒間)

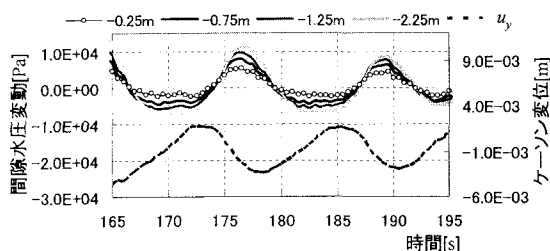


図-5 H6T12条件下でのケーソン変位とC2地点の間隙水圧変動(30秒間)

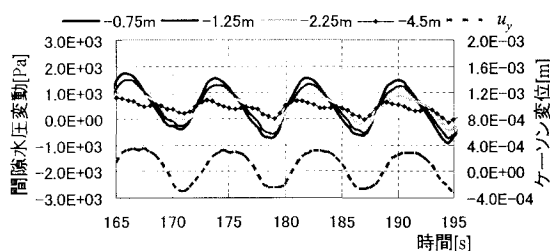


図-6 H2T8条件下でのケーソン変位とP4地点の間隙水圧変動(30秒間)

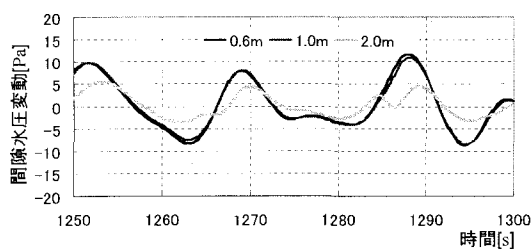


図-7 台風0423号観測時のP4地点の間隙水圧変動(50秒間)

に影響されているものと思われる。具体的には、 -0.25 m の間隙水圧が増大しているとき、ケーソンは少し遅れて正の方向(鉛直上方)に変位する。ケーソンが上方に変位すると間隙水圧は減少するが、その影響は深さが増すにつれて大きくなり、 -4.50 m ではその影響が他より大きくなっている。

次に、台風0423号通過にともなう現地観測によって得

られた観測結果と比較する。2004年10月20日14時30分頃のP4地点各深度の振動成分時刻歴(50 s 間)を図-7に示す。図-6と同様に、図-7は波力によるケーソン変位の影響で-2.0 mの間隙水圧が-0.6 mの間隙水圧に対して位相差を含んで変動していることを表している。これによって、P4地点における間隙水圧振動成分の地盤表層部(-0.6 mと-1.0 m)と-2.0 mの間に位相差を含んで変動しているのは、波浪によるケーソンの運動がマウンドを介して及ぼす地盤骨格の動的変形によるものであるといえる。また、ケーソン直下(P4地点)と同様の消波ブロック下(P3地点)における振動成分の位相差は消波ブロックの不規則な運動が招いたものだと考えられる。ケーソン直下については、ある程度一定の骨格変形が地盤内に発生するが、テトラポッドのようなびつな形式をした消波工であれば、局所的に地盤変形を加え、数10 cm 離れるだけで異なった骨格変形が発生していることが考えられる。将来的には、消波ブロックの波浪による運動も考慮に入れた数値計算を行って、構造物の動的変形が間隙水圧に及ぼす影響を考慮する必要がある。

4. おわりに

高橋ら(2002)によって提案されたVOF-FEMプログラム(CADMAS GEO-SURF)を用いて、防波堤地盤の波浪応答に関して数値計算を行った。以下、数値計算によって得られた主要な結果を記す。

- 1) 波浪負荷モードの計算によって、現地観測で計測された重複波モードの変化を再現した。
- 2) 構造物下地盤内の間隙水圧変動に表れる鉛直方向の位相差を、波浪によるケーソン運動を考慮することによって再現した。
- 3) 波浪による構造物運動によって地盤内に伝わる地盤骨格変形の影響は水圧伝播による影響が小さくなるにつれて相対的に大きくなり、深さ-2~-4 m 付近

で顕著に表れる。

今後、地盤パラメータ(せん断弾性係数や透水係数、間隙比等)の感度分析を行い、現地観測の特性を把握すると共に、現地観測を再現し、計算モデルの妥当性を検証する必要がある。そして、計算プログラムに地盤の塑性変形も考慮できるように改良し、残留間隙水圧についても定量的に扱えるようにすることが重要となる。このような方向に今後の研究を進展させたいと考えている。

参 考 文 献

- 佐々真志・高山知司・水谷雅裕・辻尾大樹(2003):実海域における海底砂質地盤の残留間隙水圧の発生と消散過程, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 846-850.
- 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.
- 鈴木高二朗・高橋重雄(1998):消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験—マウンドとブロック下部の洗掘—, 海工論文集, 第45巻, pp. 821-825.
- 鈴木高二朗・多田清富・下迫健一郎・山崎浩之・姜閔求(2003):大規模水路における波浪による地盤の液状化に関する一実験, 海工論文集, 第50巻, pp. 856-860.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・村西佳美・磯部雅彦(2002):波・地盤・構造物の相互作用に関するU- π 形式VOF-FEM(CADMAS GEO-SURF)の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 881-885.
- 高山知司・佐々真志・水谷雅裕・辻尾大樹・谷口昇太郎(2004):防波堤マウンド下における残留間隙水圧の応答に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 821-825.
- 高山知司・安田誠宏・辻尾大樹・谷口昇太郎・佐々真志・水谷雅裕(2005):消波工被覆堤下における地盤内間隙水圧の波浪応答に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第52巻, (投稿中).
- Kudella, M., Oumeraci, H. and de Groot, M.B. (2004): Wave-induced transient and residual pore pressure in the sand bed underneath a caisson breakwater: Processes leading to liquefaction -, Coastal Engineering 2004, pp. 3800-3812
- Sassa, S. and H. Sekiguchi (1999): Wave-induced liquefaction of beds of sands in a centrifuge, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp. 621-638.