

## II-33

## 波動場における矩形構造物まわりの渦構造

北海道大学工学研究科 ○正員 渡部 靖憲

## 1. はじめに

大波浪によって施工後の防波堤が破壊された事例はそう多くないようである。しかし、この中でも防波堤堤頭の部の被災事例が比較的多く確認されている。この被災を防ぐためこの部分のケーソンの大型化、消波工の設置など対策が為されているが、消波ブロックの被災も報告されている。

この被災原因として次のことが考えられる。単に大波浪の波力により、側方ケーソンからの拘束がないため被災する。大波浪の通過に伴い堤体側面から背面にかけて剥離が生じ波力の作用点が終端部近傍に移動し、終端のケーソンが被災する。堤体付近の海底砂が侵食され倒壊する。または、それらの同時発生。しかし、この領域での現象が未解明なためこの被災に対する対策は十分でなく、合理的な対策を決定する必要がある。このためには、この領域における流体運動を調査すると同時に力学特性を解明しなければならない。

B.M.Sumer et al (1997) は、砂浜海岸における直立及び混成堤周りの渦形成を可視化により調べ、実験的に得られた先掘深、剪断力に関しても細かな議論が為されている。著者らは(1996,1997,1998)、砕波の2次元・3次元シミュレーションと通して複雑な渦構造を伴う流体運動を評価し、その計算法の妥当性を検証してきた。

本研究は、先掘及び倒壊問題に対する基礎的研究として矩形構造物周りの流況、渦構造、剪断応力を同様な3次元 Large Eddy Simulation (以下 LES) によって再現し議論するものである。

## 2. 計算方法

低レイノルズ数から高レイノルズ数間で遷移する乱流を表すために繰り込み群理論によって導かれた非線形渦粘性モデル (V. Yakhot et al, 1986) を用いて sub-grid scale (以下 SGS) をモデル化し、渡部ら(1998)と同様な計算手法により LES を行った。計算領域は、図1に示すように造波境界における水深  $h_0$  で無次元化された延長 ( $L/h_0$ )、高さ ( $D/h_0$ )、奥行き ( $W/h_0$ ) がそれぞれ 10.0, 1.5, 3.0 の計算領域に造波境界から 3.0 の位置に1辺が1.0の直方体を設置する。側方の境界はy軸方向に周期境界条件を適用し、図1のように構造物を両端に設置してこの構造物の端部の流況を調べていく。入射波は次に示す2次のクノイド波を与え、波は構造物に直入射させる。波高  $H/h_0=0.4$ 、楕円関数の母数  $m=0.9$ 、構造物の辺長及び波速を代表としたレイノルズ数は  $Re=575000$  である。計算グリッドはアスペクト比ほぼ1:1:1の間隔  $dx/h_0=0.04$  であり、タイムステップインターバルは  $T/1024$  ( $T$ :無次元周期) である。底面及び構造物の壁面において non-slip 条件が与えられる。また、水表面は密度関数法によって認識される。水表面の SGS 量をどう評価するか非常に難しい問題であるが、P. Lin et al と同様に単純化し法線方向0勾配条件を適用する。

## 3. 結果

## 3.1 水位変化

図2は、波が構造物を通過するときの水位変動を表している。側方境界には周期境界を適用しており計算領域中心に対して対称であるため、片側の領域のみ示している。水位は、密度関数を水深方向に積分したものと評価している。(a)~(d) は間隔  $T/8$  の連続した位相を表してい

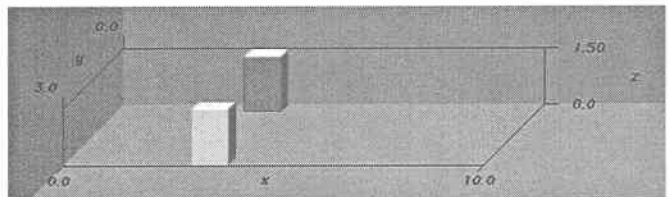


図1 計算領域と座標系

る。位相(b), (c)からわかるように波の構造物背後への回り込みがみられ回折が表現されていることがわかる。波の堤体前面における重複波, 堤体側方の通過, 屈折波の発生と一連の構造物-波動干渉を通して構造物及び底面に与える影響及び渦生成過程を次節で検討する。

### 3.2 渦生成機構

図3は位相(a), (d)におけるそれぞれy, x, z軸を軸とする各成分の渦度の等渦度面を示す。白色は無次元渦度+2の面を黒色は-2の渦度面を表している。構造物

間を波浪が通過する(a)において,  $\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial x}$

成分が波頂近傍で発生し小規模の碎波が起こっていると考えられる。また, 同時

に波の進行方向に軸を持つ  $\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y}$  成分

が水面に近い領域に生成されているのがわかる。波の進行方向対して右側の構造物付近では半時計回りの回転をもつ渦度が, 左側の構造物付近では時計回りの渦度が生成される。これらの渦は構造物と渦の位置及び回転方向から構造物に乗り上げた水塊が落下し渦を生成させたと考えることができる。この渦塊は構造物上部に影響を与える。構造物からの

剥離は  $\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$  成分に表れる。構造物沖

側の角から及び岸側からの大規模な2つの縦渦とそれらに付随する比較的小規模な渦が対になって存在していることが確認できる。これらの縦渦は構造物だけでなく海底に大きな影響を与える。

位相(d)では, 波峰が構造物間を通過し

た時に生成された正負の  $\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial x}$  が複雑

に存在し,  $\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial y}$  は波の進行方向に引き

伸ばされているのが分かる。またこの位

相はtrough level付近なので,  $\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$  の大

規模縦渦塊は水位の低下に伴い縦に縮められているのがわかる。

### 3.3 構造物にはたらく圧力

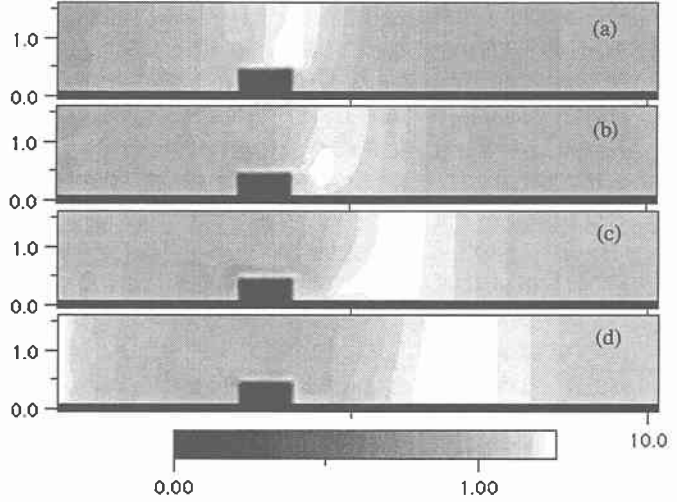


図2 水位変動 (a-dは, T/8の各位相の値を示す)

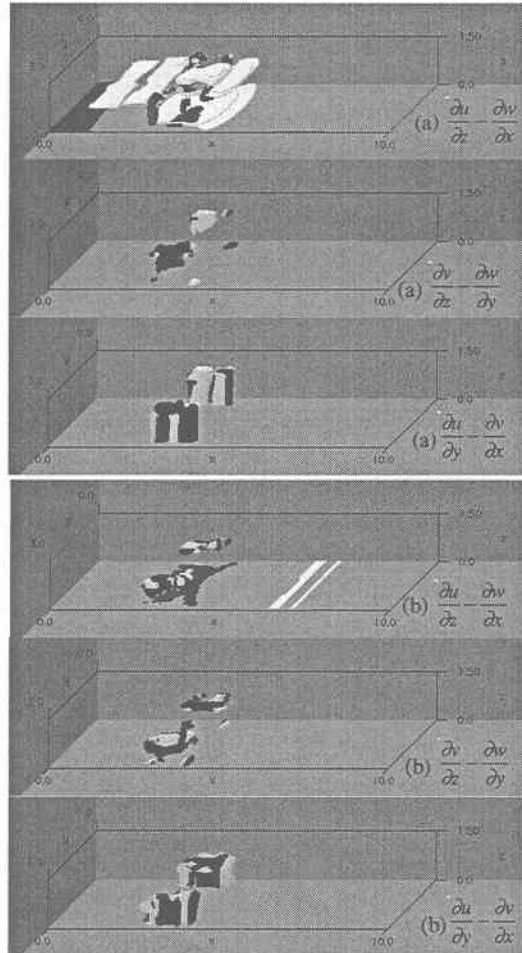


図3 位相(a)及び(d)における等渦度面 (白色; +2, 黒色; -2)

構造物にはたらく外力として圧力とそれぞれの方向にはたらく剪断力があるが、構造物の安定を考えた場合圧力が支配的であり、この節では剪断力を無視し圧力特性を調べる。

図4は位相(a)におけるそれぞれ構造物前面、側面、背面における動圧力の鉛直分布を表したものである。位相(a)では、構造物前面においてどの位置においても顕著な動圧の鉛直分布をみせない。構造物側面及び背面においては浅い位置では大きく深い位置では減少する典型的な動圧分布を示しその絶対値も水位上昇量と対応する。しかし、背面の動圧で最も構造物の角に近い位置では水位上昇量が大きいにもかかわらず他の位置と比べ動圧が小さな値を示す。特に浅い位置においてその傾向が強く現れる。これは、波峰の通過に伴い生成された大規模渦による圧力低下が原因の可能性が高い。

図5は位相(d)における同様な図である。この位相では構造物前面の角に近い位置において顕著な圧力低下がみられる。同様に水深方向に浅い領域においてのみこの傾向が確認できる。一方、側面においてはそれぞれ岸沖方向の位置において鉛直勾配が異なるのがわかる。水表面付近で類似した動圧が水底近傍で異なる値を持つことは波動として圧力を考えた場合不自然であり、これも渦が何らかの影響を与えていると言える。しかし、今回適用した波浪条件においては構造物の安定に引き起こすような明確な圧力変動は確認されなかった。

図6は、それぞれ構造物の前面、側面、背面における全圧の作用点を位相毎にプロットしたものである。背面の作用点は水位変動量に対応して鉛直方向に位相変化をみせるが、前面における作用点は位相(a)において構造物端部方向に偏心している。この偏心圧力は構造物の安定に影響を及ぼす。波浪は構造物に直入射させているので構造物前面においてこのような偏心圧力が発生するとはいへない。生成された渦が影響し

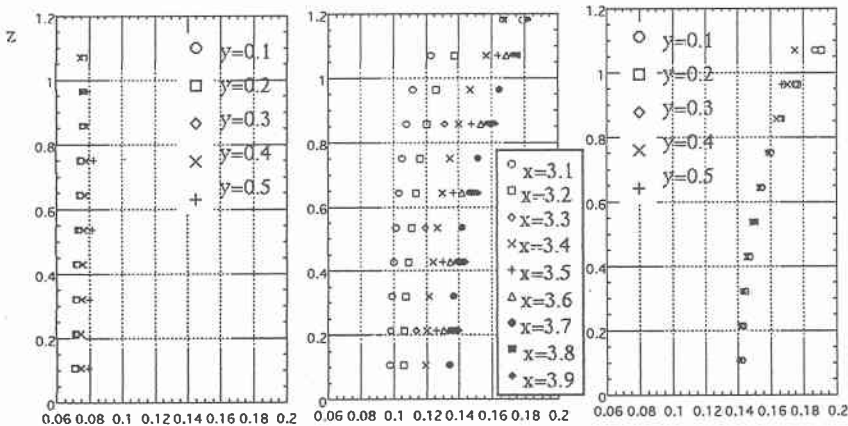


図4 位相(a)における動圧の鉛直分布 (左; 堤体前面, 中央; 堤体側面, 右堤体背面)

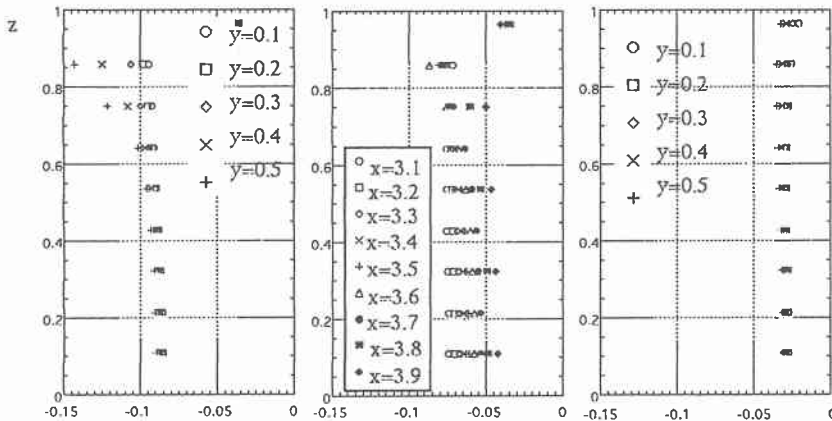


図5 位相(d)における動圧の鉛直分布 (左; 堤体前面, 中央; 堤体側面, 右堤体背面)

ていると考えられる。

### 3.5 底面剪断力

前述した大規模渦は、その剪断力により砂の浮遊・局所洗掘に大きく寄与する。木村ら(1996)は、堤頭部の被覆材の重量、根固め工について検討するために、洗掘深を測定した。洗掘は堤頭部の角2カ所で発生し、波浪諸元によっては倒壊等の大変形を引き起こすことを指摘している。

図7は、位相(a)及び(d)におけるそれぞれの方向の剪断力成分  $\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$  である。岸沖

方向の応力を示す  $\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$  は、波峰が構造物を通過する時に構造物両角において強化されているのがわか

る。また、位相(d)の波のトラフが構造物を通過するときにも沖側の角近傍で同様に強化される。  $\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$

成分に関しては、位相(a)においては沖側が正、岸側が負の値を持って各角を中心に同心円状に広がる。対照的に位相(d)では、岸側が正、沖側が負の値を持ち同様な分布構造を持つ。剪断力集中箇所である構造物角部を中心とした洗掘は3.2で示した鉛直軸を軸とした剥離渦が直接影響していると考えられ水面をもつ剥離渦の生成特性からモデル化できると考えられる。このためにはさらに多くのケースにおける解析が必要である。斜め入射の場合の旋回渦成分が卓越するケース、あるいは構造物通過時に碎波を伴う場合の渦下洗によりさらに大規模な洗掘が発生する可能性がある。

### 4. 結論

3次元LESにより矩形構造物周りの渦構造、圧力及び剪断力特性を解いた。

構造物を波浪が通過する時、剥離渦、旋回渦さらに碎波する場合水平渦を伴う3次元渦構造となる。特に剥離渦は堤頭部水表面付近で圧力を大きく変化させる。局所洗掘問題に重要なファクターである剪断応力特性を調べた。

### 参考文献

B.M.Sumer, J.Fredsoe, Scour at the head of a vertical-wall breakwater, 1977, Coastal Engineering, pp.201-230.

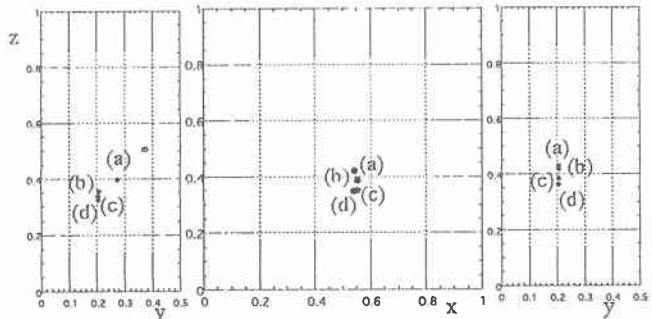


図6 全圧の作用点の位相変化 (左：堤体前面，中央：堤体側面，右：堤体背面)

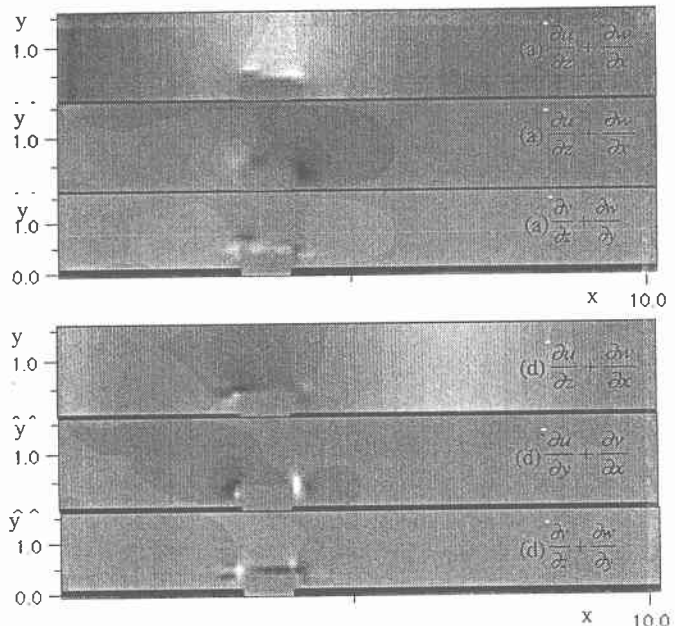


図7 位相(a), (d)における剪断応力分布