

透過式消波構造物沖合の地形変化機構に関する実験的研究

宇多高明*・小俣 篤**・峯松麻成***

1. ま え が き

沖合に設置された消波構造物周辺の海底地形変化に関しては、従来、防波堤沖の洗掘の問題に焦点が当てられてきた。野田(1970)は、重複波の場合における質量輸送速度の分布と地形変化の関係を論じた。また、入江ら(1984)は、底質の浮遊状態に着目し、沈降速度と進行波の底面流速振幅の比により地形変化パターンを分類した。これらは、Carter *et al.*(1973)が底面質量輸送速度の岸沖分布と地形変化とを関係付けた手法と同様な考えに立つ。一方、水口ら(1985)、西沢・沢本(1989)は杭周辺の局所洗掘に関して、小口径の杭周りに生じる洗掘について調べるとともにそのパターン分類を行った。しかし、これらの研究では杭周りの地形変化を予測するまでには至っていない。

筆者らは、ジャケット型の群杭構造物および透過性消波構造物周辺の地形変化について現地観測を行い、それらの構造物周辺で大規模な地形変化が生じていることを報告した(宇多ら、1988; 1989)。これらの地形変化はその規模からみて反射波の影響により生じたと考えられ、野田、入江らの研究で扱われているタイプの地形変化と推定される。しかし、構造物の延長が短く、反射率が低いことから地形変化パターンが明瞭ではなく、このため構造物周辺での地形変化の機構は十分に明らかにできていない。本研究では、透過性消波構造物沖合の海底地形変化を移動床水理模型実験により検討することにより、その変化機構を明らかにする。さらに、海底地形変化の予測モデルの開発を行う。

2. 実験内容

実験の対象とする構造物模型は角材を利用した縦スリットとし、反射率が 0.7 および 0.3 となるよう空隙率を調整した。このような移動床実験では底質の選定が重要である。ここでは、底質の浮遊状況を現地と同様にす

るために、入江ら(1984)にならい進行波の底面流速振幅 $\hat{U}_b$ と底質の沈降速度 w_0 の比 $(\hat{U}_b/w_0)$ が現地条件と同一となるよう底質を選定した。駿河海岸の構造物設置地点における $\hat{U}_b/w_0$ はほぼ 20~30 である。実験水路では入射波高 H_i が最大で 15 cm 程度に制約されることから、実験には中央粒径 $d_{50}=0.15$ mm、比重 $s=2.65$ ($w_0=0.84$ cm/s, Rubby の式による)の砂を用いた。これにより実験では $\hat{U}_b/w_0=20\sim25$ の条件とすることができた。実験には片面ガラス張りの長さ 142 m、幅 0.6 m の造波水路を用いた(図-1)。沖水深を 1.2 m とし、水路途中から 1/50 勾配の木製斜面を設置し、水深 70 cm の位置から水平床とした。長さ 12 m の水平床部分を厚さ 30 cm の移動床とし、移動床の沖端から 10 m の位置に構造物模型を設置した。水理条件はフルード相似に従うこととし、縮尺を 1/10 に設定した。駿河海岸での構造物設置水深は 7 m であることから模型設置水深は 70 cm とした。現地の波浪条件は有義波高 0.5~1.5 m、周期 8~9 s にあるので、実験では表-1 に示す 2 種類の波浪を設定し、全体で 3 ケースの実験を行った。また、水平床部分を仕切板により 2 等分し、模型からの反射が水路幅の半分のみで生じるようにすることにより、

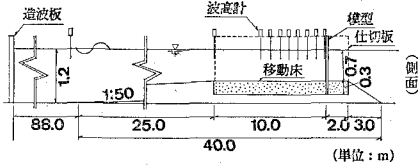


図-1 実験装置

表-1 実験条件

ケース	波浪条件		反射率	空隙率
	H_i (cm)	T (sec)	K_r	ϵ
1	10.0	2.80	0.73	0.025
2	15.0	2.50	0.67	0.025
3	15.0	2.50	0.30	0.20

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員
*** 正会員 元建設省土木研究所海岸研究室部外研究員
(株)トヨコマリテック

多重反射を緩和した。

実験では地形変化、波高、浮遊砂濃度、流速分布を測定した。地形は側壁と仕切板の中央に定めた測線上を5 cm 間隔で測定した。波高、浮遊砂濃度、流速の測定にはそれぞれ容量式波高計、光学式濁度計、超音波式流速計を用いた。また、これらの測定では、各測点ごとに7, 8波のデータを取得した。更に、反射率は Healy の方法で求めた。

3. 地形変化の特性

実験では、底質を平坦に敷均した後、地形変化が安定するまで20または23時間波を作用させた。ケース1, 2の海底形状の経時変化を図-2, 3に示す。断面図に見られる波長10~20 cmの小起伏は砂澱を表わしている。入江ら(1984)は重複波による地形変化のタイプを、腹と節の中間が侵食され、節に堆積し腹ではあまり変化の生じないN-タイプと、節の部分が侵食され腹に堆積するL-タイプに分類した。ケース1の実験結果は、構造物近くを除くと節と腹の中間が侵食され節に堆積し、腹ではやや堆積していることからN-タイプの地形変化と考えられる。また、構造物直前では局所洗掘により地盤高がかなり低下している。結局、構造物近くではN-タイプの地形変化と局所洗掘が重なった地形形状になった。ケース1よりも波高の高いケース2では、地形変化傾向が異なり、 $X=2\sim7$ mの範囲では節の部分が侵食され腹に堆積するL-タイプの地形変化となった。また、局所洗掘深はケース1より大きい。さらに、 $X=3, 6$ mの腹付近の堆積量に比べ $X=1$ m 付近の堆積量がかなり大きいことから、局所洗掘により侵食された底質がこ

の部分に堆積したと考えられる。この結果、 $X<2$ m ではL-タイプの地形変化で生じる堆積のピーク位置が約1 m 沖に移動したと考えられる。ケース2の侵食、堆積量の絶対値はケース1よりも大きく、波高の差が堆積、侵食域の分布やそれらの規模に影響することが明らかである。

一方、ケース2と波浪条件が同じで反射率の低いケース3では、地形変化の規模は小さくなったが、地形変化のパターンはケース2と類似し、L-タイプの地形変化と構造物直下の局所洗掘が生じた。

さらに、実験時の観察によれば、砂澱の発生状況は、波高および反射率と共に変化することが分かった。砂澱の発生状況が岸沖方向に変化することは、その影響により底質の浮遊状況や質量輸送速度の分布が岸沖方向に変化することを示唆する。

4. 地形変化の機構

重複波の作用下での地形変化に関する研究は数多いが、浮遊砂濃度分布と地形変化の関係や、浮遊砂濃度の岸沖分布に関する研究は少ないようである。重複波の場合では底面流速振幅は岸沖方向に変化する。また、観察によれば砂澱の形状も岸沖方向に変化する場合がある。そこで構造物位置と、重複波の腹のうち最も構造物に近接する腹の間において浮遊砂濃度分布を調べた。

浮遊砂濃度は、底面から高さ $Z'=1\sim25$ cm の区間で測定した。ケース1の各測点における浮遊砂濃度の時間

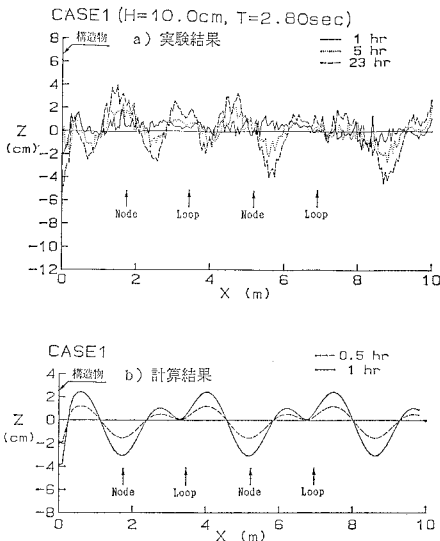


図-2 構造物沖合の地形変化図(ケース1)

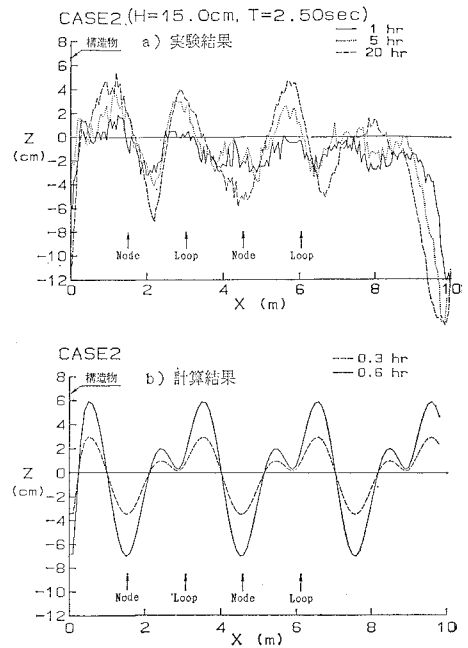


図-3 構造物沖合の地形変化図(ケース2)

平均値 C_m の鉛直分布を 図-4 に示す。濃度分布形および底面より十分高い位置の濃度は、構造物からの距離とともにかなり変化している。底面付近の濃度勾配は節近くの $X=1.150\text{ m}$, 1.725 m で大きく、腹の位置 $X=0\text{ m}$, 3.45 m で小さい。これは、節で底面流速振幅が大きく、腹では小さいことに対応すると推定される。また、構造物位置では局所洗掘による底質の巻き上げにより、他の測線と傾向が異なつたと考えられる。底面より十分高い位置の濃度に関しては、 $Z' \geq 10\text{ cm}$ では全ての測点では C_m 鉛直方向にほぼ一定である。また、その絶対値は構造物位置で大きく、 $X=3.45\text{ m}$ 位置を除けば構造物から離れるほど小さくなる。スリット型の構造物では消波時に乱れが発生するため、構造物直下で巻き上げられた底質がこの乱れにより拡散することが示唆される。以上のことから、浮遊砂濃度には波動運動による底質の浮遊と構造物周辺での浮遊砂の拡散とが関与することが分かる。そしてこのような浮遊砂濃度の場所的な変化は漂砂量の分布に影響するので、地形変化機構を支配する重要な要因となる。

底面付近の流速振幅と浮遊砂濃度の関係を調べるため、反射率の異なるケース 1 と 3 について波高 H 、流速振幅 $\hat{U}_b$ および浮遊砂濃度の岸沖分布を 図-5, 6 に示す。ここで浮遊砂濃度は C_m に加えて、1 波ごとの最大浮遊砂濃度を平均した値 C_{mx} も示した。反射率の高いケース 1 では (図-5), $\hat{U}_b$ は節で最大、腹で最小となり、節を中心としてほぼ対称形である。 $Z'=1\text{ cm}$ の C_m および C_{mx} の分布形は $\hat{U}_b$ のそれとかなり良く対応している。ケース 3 (図-6) では反射率が低いので $\hat{U}_b$ の変化は小さくなるが、 $Z'=1\text{ cm}$ の C_m および C_{mx} の分布形状はケース 1 と同様に $Z'=2\text{ cm}$ の $\hat{U}_b$ と良い対応を示す。ケース 3 では構造物位置 ($X=0\text{ m}$) で $\hat{U}_b$ が急に増大している。この原因は、他のケ

ースよりもケース 3 の空隙率 (透過率) が大きく、したがって空隙部の透過流速が速くなったためと考えられる。また、空隙部の流速が速くなるに伴い、乱れも大きくなった結果、 C_m , C_{mx} も大きくなったと考えられる。

一方、反射率の高いケース 1 の場合、 $Z'=25\text{ cm}$ の C_m , C_{mx} は、構造物からの距離とともに単調に減少し、 $\hat{U}_b$ との対応はみられない。さらに、構造物位置 ($X=0\text{ m}$) での $Z'=1\text{ cm}$ および 25 cm の C_m , C_{mx} の差は小さい。この点は、これらのケースでは構造物直下で

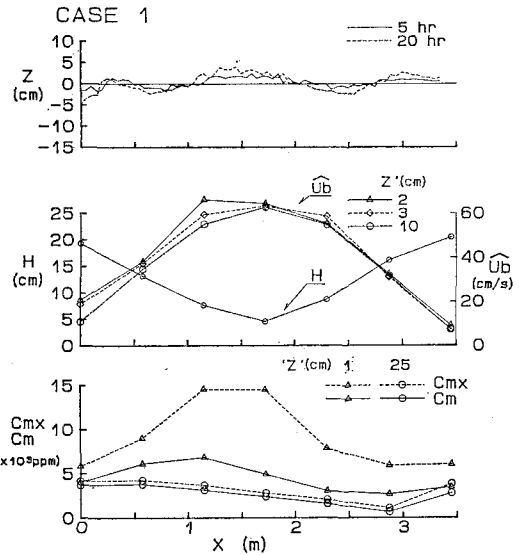


図-5 地形変化、波高、流速振幅、濃度の岸沖方向分布 (ケース 1)

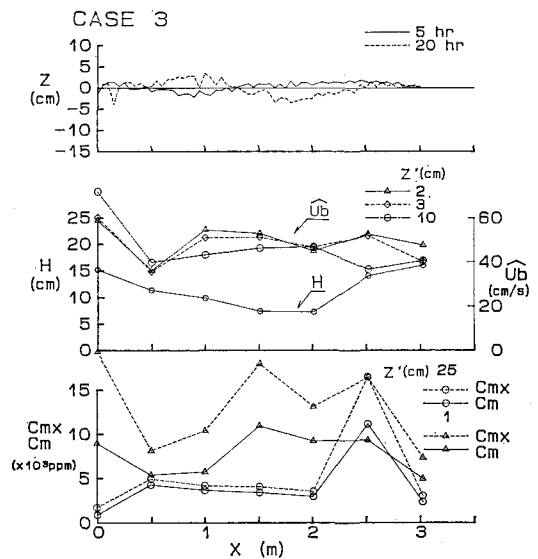


図-6 地形変化、波高、流速振幅、濃度の岸沖方向分布 (ケース 3)

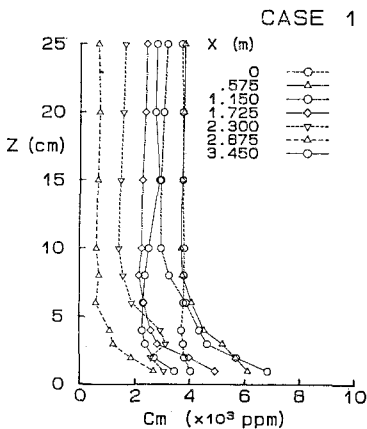


図-4 浮遊砂濃度の鉛直分布 (ケース 1)

巻き上げられた底質が、 $Z' \leq 25$ cm の範囲ではほぼ均一に浮遊したことを示すと考えられる (図-4 参照)。一方、反射率の低いケース 3 (図-6) では $Z' = 25$ cm の C_m , C_{mx} の分布形状にケース 1 のような傾向は見られない。構造物位置で $Z' = 25$ cm の C_m , C_{mx} が小さいのは、空隙部での透過流速が速くなったため、堤脚部で巻き上げられた底質の多くが透過側および反射側へと水平方向に拡散したためと考えられる。このように、構造物近くの濃度分布は反射率によりかなり異なる。結局、反射率の高いケースの場合に $Z' = 10 \sim 25$ cm での浮遊砂濃度に構造物の影響が強いことが分かった。

以上の実験結果より地形変化機構をまとめたフローを作成した (図-7)。構造物の影響の及ばない沖合での波動場は岸沖方向にほぼ対称と考えられるので、ここでは Net の掃流砂は無視している。

5. 海底地形変化のモデル化

5.1 モデル化の検討

実験結果をもとにして海底地形変化モデルを作成した。モデルでは浮遊砂濃度と Euler 平均流速の鉛直分布の関係より、漂砂量と漂砂の移動方向を求め、連続式により地形変化量を計算する。浮遊砂濃度は、波による底質の浮遊と構造物位置からの拡散を考慮し、両者を重ね合わせた。Euler 平均流速は、鉛直分布形状のパターンのみに着目し、Longuet-Higgins (1953) の層流解を用い、動粘性係数 ν を調整することにより適用した。

浮遊砂濃度は波動運動に伴う浮遊砂の濃度 C_w と構造物の堤脚部で巻き上げられた底質の拡散の結果生ずる浮遊砂濃度 C_s の線形和として

$$C = C_w + C_s \quad (1)$$

と与えた。また、 C_w の鉛直分布形状の岸沖方向変化 (図-5 参照) を表現するために、次式を仮定した。

$$C_w = C_{w0} \exp\{a \exp(-bZ')\} \quad (2)$$

底質条件は一定であるから、浮遊砂濃度に与える砂漣形状の岸沖方向変化の影響が小さいと仮定すれば、 C_w

は $\bar{U}_b$ のみの関数とできる。また、構造物に最も近い節の位置より沖の浮遊砂濃度のデータには構造物の影響はあまり含まれていないと考えられるので、これらの位置の浮遊砂濃度は C_w 成分のみとなる。そこで、これらのデータを用いて実験結果と合うように式 (2) の係数 a , b を $\bar{U}_b$ の関数として求めた次式となる。

$$C_{w0}(\text{ppm}) = 21.9 \bar{U}_b^{1.5} \\ a = \sqrt{\bar{U}_b/6} : b = 0.16 \sqrt{\bar{U}_b}$$

ただし、 $\bar{U}_b$ の単位は cm/s である。

C_s の鉛直分布は実験結果 (図-4 参照) より一定と仮定した。また、 C_s の岸沖方向分布は、構造物周辺の乱れに関係するので、 $Z' = 25$ cm の流速記録から求めた乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ (10 Hz 以下の流速変動と定義) の岸沖方向分布を調べた (図-8)。流速測定に用いた超音波式流速計は 5 cm 離れた 1 対の振動子間の平均的な流れを計測しているので、流速の高周波変動の測定精度に問題はあるものの、乱れ強度分布の定性的な把握は可能である。図より乱れ強度は構造物近くで急激に減少することが分かる。このことから、

$$\sqrt{u'^2} \propto \exp(-BX) \quad (3)$$

とおく。浮遊砂の拡散係数 K_x は乱れ強度と混合距離の積に比例すると考え、混合距離を一定と仮定して、定常一次元の拡散方程式を解けば次式が得られる。

$$C_s = C_{s0} \exp\{-W_0/(AB) \cdot \exp(BX)\} \quad (4)$$

C_s の供給源は堤脚部での底質の巻き上げであるから、 C_{s0} は主に堤脚部でのスリット間の間隙流速 V に支配されると考えた。 V に林・服部 (1966) が導いた次式を用いる。

$$V = \frac{\sqrt{2g K_r H_t}}{\sqrt{1 - (C_e \epsilon)^2}} \quad (5)$$

ここに、 ϵ : スリットの空隙率、 K_r : 反射率、 g : 重力加速度、 C_e : 流量係数 (=0.6) である。更に、堤脚部での砂の巻き上げが間隙のみで生じ、その巻き上げ量が V^2 に比例すると仮定すれば、

$$C_{s0}(\text{ppm}) = \alpha V^2 / \epsilon \quad (6)$$

ここに、 α は定数である。節より沖側での濃度は C_w のみと考えられるので、節を中心に沖側の分布形を線対称に折り返せば C_w の分布形状が得られ、更に節より岸側の濃度データから折り返した C_w を差し引くことにより

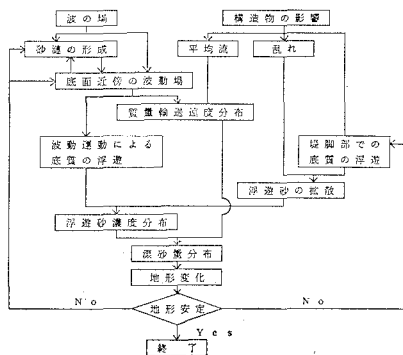


図-7 地形変化の機構

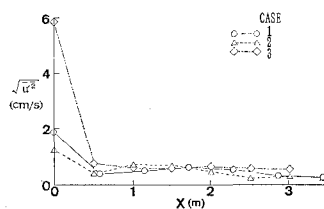


図-8 乱れ強度の岸沖方向分布

C_s を推算できる. このようにして推定した $Z'=25\text{ cm}$ の C_s の岸沖分布を参考として式(4)の係数を定めた. なお, 空隙率の大きな場合に空隙部を通過する流速が大きく乱れ強度も大きくなることから, 式(4)の B は反射率の関数とした. 最終的に C_s は次式となる.

$$C_s(\text{ppm})=3.57(V^2/\varepsilon) \cdot \exp\{-1.5 \exp(5.4 K_T \cdot X \times 10^{-2})\} \times 10^{-2} \dots (7)$$

Euler 平均流速の計算に当っては, 理論解中の ν をそのまま渦動粘性係数として, Euler 平均流速の測定結果と理論解との比較より $\nu=50\text{ cm}^2/\text{s}$ に設定した.

5.2 計算結果

ケース1, 2の地形変化の計算結果を前出の図一2, 3に示す. 実現象では地形変化に伴い漂砂量が減少し, 地形はある時間の後には安定する. モデルでは漂砂量を定常としているため, 地形の安定化機構は含まれていない. したがって, ここでは地形変化の傾向のみを検証する. ケース1では, $X>5\text{ m}$ に注目すると侵食・堆積の状況が実験値と良く一致している. 一方, $X<5\text{ m}$ では, 侵食・堆積区域の位置が一致せず, 計算値は実験値を約1m岸方向にずらした形状となっている. このような差異が生じた原因としては, 構造物の影響により平均流速場が変化したこと, 浮遊砂濃度と平均流速の鉛直分布の関係が, 実験値と計算値とで微妙に異なることなどが考えられる.

ケース2の計算結果は, $X=2\sim 6\text{ m}$ の範囲で実験による地形変化の傾向とかなり良く一致している. $X>6\text{ m}$ の範囲の実験値には, 移動床端部の影響が及んでいると考えられる. また, $X<2\text{ m}$ の範囲では実験と計算で生じた侵食域に差があるが, これはケース1と同様の理由によると考えられる.

空隙率の大きなケース3では, 構造物近くの局所洗掘が再現されなかった. ケース3では空隙率が大きいいため特に構造物位置での流速振幅が大きい. この点により, 構造物直下での局所的な底質の浮遊が計算で過小評価され, 局所洗掘が再現されなかったと考えられる. さらに, 計算モデルでは考慮されていない構造物による Euler 平均流速場の変化も無視できなくなり, 計算値と実験値との差が大きくなったと考えられる.

6. 結 論

①実験によると, 構造物沖合の地形変化は反射率および

波高に応じてN-タイプあるいはL-タイプとなり, 構造物の近くでは局所洗掘による地形変化が重なる.

②構造物沖合の浮遊砂濃度は, 波動運動による底質の浮遊, および構造物直下で浮遊した底質が構造物より発生した乱れにより拡散される現象に支配される. ただし, 構造物より発生する乱れは沖方向に急激に減衰するため, 構造物の影響は構造物に最も近い節の位置付近までしか及ばない.

③透過式消波構造物の沖合では, 反射波により形成される部分重複波の場における地形変化と, 構造物直下での底質の浮遊および構造物から発生する乱れに起因する底質の拡散による地形変化が生じる. 構造物は周辺の平均流速場を変化させることにより, 更に地形変化に影響を及ぼす. また, 部分重複波の場では砂漣の発生状況が岸沖方向に変化することにより, 底面付近の鉛直渦動粘性係数も岸沖方向に変化する. したがって, 砂漣の発生状況も地形変化を支配する重要な要因となる.

④本研究で開発した計算モデルによれば, 空隙率の大きなケースを除いて, 実験の地形変化傾向を再現することが可能である.

参 考 文 献

- 入江 功・近藤隆道・赤石正広・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での海底洗掘, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 350~354.
- 宇多高明・堀 博志・村井禎美・藤原隆一 (1988): 杭式海洋構造物周りの洗掘実態調査, 海洋開発論文集, Vol. 4, pp. 123~128.
- 宇多高明・中村瑛佳・村井禎美・松永博史 (1989): 有脚式離岸堤周りの初期洗掘の現地調査, 海岸工学論文集, 第36巻 pp. 409~413.
- 西沢 勝・沢本正樹 (1989): 波による円柱まわりの局所洗掘 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 414~418.
- 野田英明 (1970): 波動境界層における質量輸送と海底の洗掘 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 59~66.
- 林 泰造・服部昌太郎・白井増次郎 (1966): 透過性鋼管防波堤の水理, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 97~101.
- 水口 優・小島巨人・小宮山正二・佐藤 忍 (1985): 波動による小口径円柱まわりの局所洗掘に関する実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 430~434.
- Carter, T. G., P. L. F. Liu, and C. C. Mei (1973): Mass transport by waves and offshore sand bedforms, J. Waterways, Harbours Coastal Eng. Div. ASCE, 99, pp. 165~184.
- Longuet-Higgins, M. S. (1953): Mass Transport in Water Waves, Phil. Trans. of Royal Soc., London, Series. A, No. 903, Vol. 245, pp. 538~581.