

重複波による防波堤前面での海底洗掘

——底質の移動機構に着目した研究——

入江 功*・近藤隆道**・赤石正廣***・寺崎賢次****

1. ま え が き

港湾施設の拡充により防波堤延長が非常に長くなった最近では、水深の大きい重複波領域でも防波堤の安定を脅かすような洗掘が生じている例がみられるようになった。これに対する有効な対策を見出すためには、実験的手段がしばしばとられる。しかし現地の洗掘現象を少なくとも定性的に相似に実験室内に再現する条件についてはいまだに明らかにされてはいない。本研究は比較的大水深部における混成堤方式の防波堤を対象に、重複波による前面の二次元的洗掘機構をレーザードブラー式流速計（以下 LDV という）による詳細な流速測定により明らかにし、模型の再現性を高めることを目的とするものである。

2. 固定床上での底質移動

（1）実験方法および内容

重複波の下での流速場と底質移動との関係を調べるため固定床実験を実施した。実験は長さ 44.5 m、深さ 1 m、幅 49.5 cm の両面ガラス張りの水路内で水深を 25 cm とし、一端に直立壁を設置して行なった。底面条件としては、平滑面に自然砂（ $d_{50}=0.33$ mm）を吹きつけた場合、さらに 図-1 に示すように、1.0 cm×1.0 cm および 0.5 cm×1.0 cm の断面を有する角材をそれぞれ 5 cm および 3 cm おきに置いた人工粗度を有する場合について調べた。流速の測定は LDV による。流体の測定体積は $\phi 0.2$ mm×2.2 mm と微小であり、測定記録から 0.01 sec のサンプリング間隔で AD 変換し平均流などを求めた。

（2）平均流の特性

底面に $d_{50}=0.33$ mm の自然砂を吹き付けて粗度をもたせた場合について、 $H_0=7$ cm、 $T=1.6$ sec の波を作用させたときの重複波による平均流の空間分布の LDV による測定結果を 図-2 に示す。底面から 1.0 cm 程度の

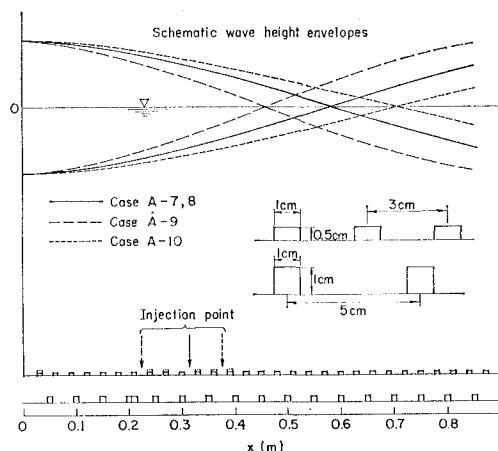


図-1 人工粗度の形状と配置

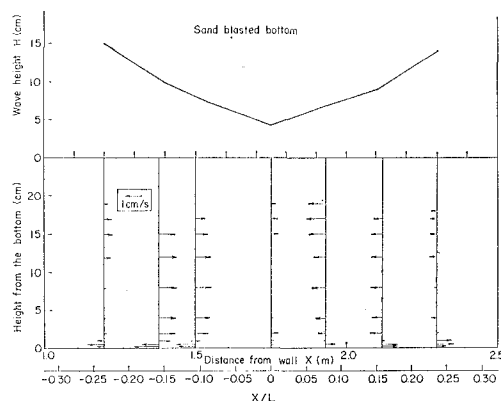


図-2 平均流の空間分布（砂吹付底面）

高さまでは重複波の節から腹へ向かう流れがあり、それより高い領域では逆に腹から節へ向かう平均流が認められる。腹節を境にして独立した循環流が存在するという Longuet-Higgins¹⁾ の理論に従えば、底面より 1.0 cm 高さまでの節から腹へ向かう流れは境界層外縁の流れに相当するものと考えられる。同理論によれば、境界層の下層に腹から節へ向かう逆転層があり、野田²⁾はこの逆転層が底面粗度の増大にともないその層厚を増し、底質移動の方向を定める役目を果たすことを理論的に示した。

図-3 は、底面に 1 cm×1 cm の角材を 5 cm ごとに並

* 正会員 港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長
 ** 港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室
 *** 第五港湾建設局 四日市港工事事務所工事課
 **** 港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室

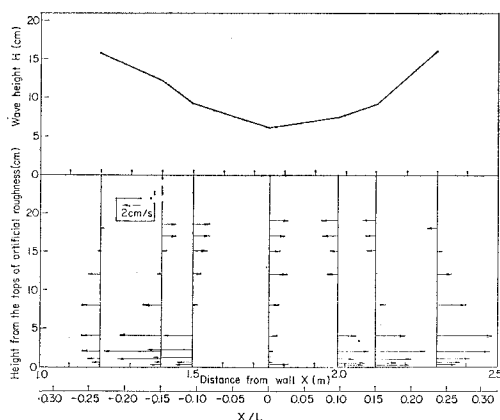


図-3 平均流の空間分布 (人工粗度 1.0 cm × 1.0 cm)

べて人工粗度をつけた場合の LDV による平均流の測定結果である。入射波の条件は図-2 の場合と同じであるにも拘らず、節から腹へ向かう平均流の層厚は 1 cm (図-2) から 5 cm (図-3) 程度

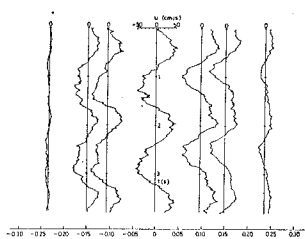


図-4 図-3 の各位置における底面流速の時間変化

までと著しく発達しているのがわかる。底面が移動床の場合にはリップルが存在し、図-3 と同様の底面沿いの平均流が存在するものと考えられ、底質移動を考察する上でこの事実は重要である。また 図-3 より、底面粗度が発達しても境界層下縁の逆転層の発達は認められないようである。

(3) 底質の移動特性

重複波の下での底質移動がもし質量輸送流によるものであれば、図-3 に示す測定結果から、底質はすべて節から腹の方向へ移動することになるが実際はどうであろうか。これを調べるために 図-1 に示すように、重複波の腹と節との中間に位置する人工粗度の間に石炭粉 ($d_{50}=0.27$ mm, $\rho=1.58$), 標準砂 ($d_{50}=0.20$ mm, $\rho=2.65$), 自然砂 ($d_{50}=0.33$ mm, $\rho=2.65$) を投入しその移動を追跡した。図-5, 6 にその結果を示す。図中白い矢印は底質を投入した位置を示す。波を作用させると、底質は一部人工粗度による後流渦に拘束され、一部は浮遊した状態で重複波の腹および節の方へ分散しつつ移動した。波をおよそ 2 分間作用させた後、各粗度間に落着いた底質をサイフォン吸入法により採取し容積を測定した。図より、底質は投入点を中心に腹・節の方向へ移動しているが、底質の種類、粒径により正味の移動が腹へ向かう場合および節へ向かう場合があることがわかる。そこで、正味の移動方向を次の方法により判定した。すなわち、初期投入の底質のうち、投入点より腹の方へ移

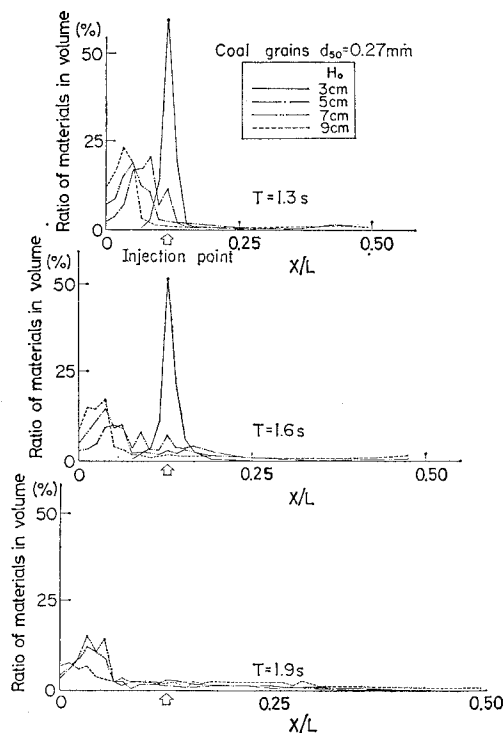


図-5 人工粗度上の底質移動 (石炭粉の場合)

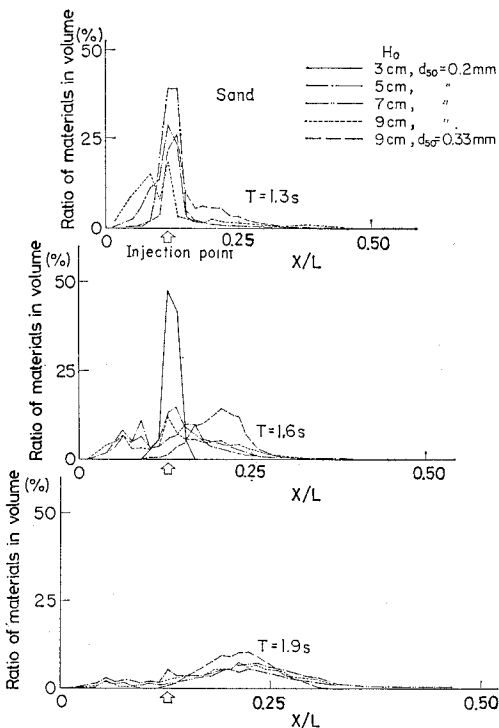


図-6 人工粗度上の底質移動 (砂の場合)

動した底質の量を V_L 、節の方へ移動した量を V_N とし、 $V_L/V_N \geq 1$ で判定する、 $V_L/V_N > 1$ であれば正味の移動は腹へ向かうものであり、 $V_L/V_N < 1$ であれば逆方

向と判定する。もし重複波の下での底質移動が質量輸送のみに依存するのであれば、図-3より底質の正味の移動方向は節から腹へ向かうはずであり、 $V_L/V_N > 1$ でなければならない。しかし図-5, 6によれば、 $V_L/V_N < 1$ の場合もあるので、その理由について考えてみる。人工粗度の上を移動する底質の観察によりつぎのことがわかる。底面近くの水粒子運動により人工粗度の下流側に渦が発生し、これが底質を巻き上げ、一部の底質はいくつかの人工粗度を越えて下流側に運ばれるが一部は人工粗度下流側の渦に取り込まれる。渦に取り込まれた底質は、渦が発生している間大部分が渦に取り込まれた状態に保たれ、それより下流に運ばれることは少ない。水粒子運動が逆位相になったとき、渦の中に取り込まれた底質は逆方向へいくつかの人工粗度を越えて運ばれ、今度は逆位相の軌道流速の下で人工粗度の下流側に渦が発達する。以上の往復運動の繰り返しの中で、もし底面に沿う水粒子運動の流速波形が往復同じであれば人工粗度の左右に発達する渦は同規模のものであり、正味の底質移動はないであろう。しかし図-4に示すようにこの流速波形は往復同じではなく、腹向きの位相のときが、節向きの位相のときより流速がゼロから最大値に達するまでの時間が長い。このため、渦の発達時間の長い腹向きの位相の流れのときに発達する渦の方が、逆の場合より常に大きいことになり、結果として節向きの正味の底質移動が増大する方向へ寄与することになる。結局重複波の下での節と腹の中間域における底質移動は、図-3に示したような節から腹へ向かう平均流に乗って腹の方向へ運ばれる底質の量と、底面粗度に拘束されて節の方向へ移動する量との相対的割合により決定されるものと思われる。

図-4に見られる流速波形の歪みは、明らかに波の有限振幅性によるものである。浅海領域における進行波の有限振幅性は、通常 Ursell 数 ($=HL^2/h^3$) で表わされる、ここに、 H , L , h はそれぞれ進行波の波高、波長、水深である。また、節から腹へ向かう平均流に乗って運ばれる底質の量はその浮遊量と関係している。底質の浮遊の割合は相対速度 u_b/w によって表わすことができる。ここに、 u_b は進行波の下での底面に沿う水粒子速度の最大値、 w は底質の沈降速度である。重複波の場合は節から腹の位置に至るまで底面に沿う水粒子速度が変化するので、ここでは腹と節との中間の位置における水粒子速度の最大値に相当するものとして進行波による底面最大流速を用いることとした。図-7は、先に述べた腹へ向かって移動した量 V_L と、節へ向かって移動した量 V_N との比 V_L/V_N と、水粒子の相対速度 u_b/w に関する実験結果を示したものである。図中の各点に対してある数字は、Ursell 数 ($=HL^2/h^3$) である。図中の斜線はこれらの Ursell 数の分布から与えられる平均曲線である。図中の

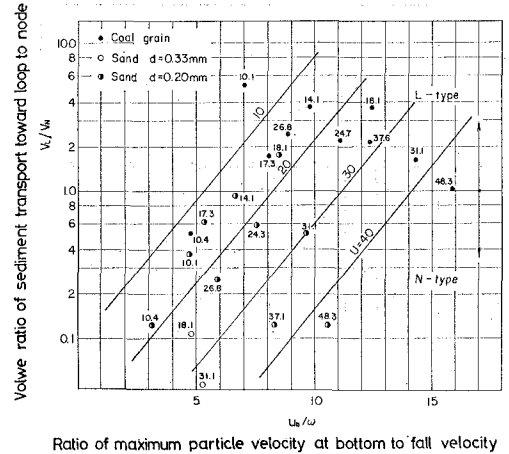


図-7 L, N-タイプの発生限界

L-タイプ, N-タイプは以下のように定義した。

L-タイプ = $V_L/V_N > 1$ であり、底質の正味の移動方向が節から腹へ向かうもの

N-タイプ = $V_L/V_N < 1$ であり、底質の正味の移動方向が腹から節へ向かうもの。

この図より、

- 同じ Ursell 数に対しては、 u_b/w がある値以上になれば N-タイプから L-タイプに移る。
- 同じ u_b/w に対しては、Ursell 数が増大するほど L-タイプから N-タイプに変わる傾向にある。

ということがわかり、先に述べた底質の移動機構を裏書きしているようである。

3. 移動床での底質移動

(1) 実験方法および内容

実験水路としては、長さ 25 m、幅 1 m、深さ 0.62 m の片面ガラス張りの水路を仕切板により二分したものを利用した。水路の一端から 8 m の区間に砂を厚さ 10 cm に敷き均して移動床とした。防波堤としては、直径 2~3 cm の砕石でマウンドをつくり、その上に堤体を置いた。底質としては、固定床に用いたものと同様の石炭粉、標準砂、自然砂を用いた。波の周期としては、固定床の場合の中間の値に相当する $T=1.6$ sec とし、波高を種々変化させた。

(2) 重複波による海底洗掘型式

底質材料に石炭粉を用い、入射波の周期を 1.6 sec、波高 $H_0=3$ cm~6.5 cm の波を 6 時間作用させた後の地形を重複波の包絡線とともに示したのが図-8である。防波堤マウンドの標準断面として平均的法肩長=10 m (模型縮尺 1/40 として模型長=25 cm) を用いたので、その法先より沖の海底地形が示されている。図から、海底地形の変化は重複波の腹、節の位相と密接な関係があり、

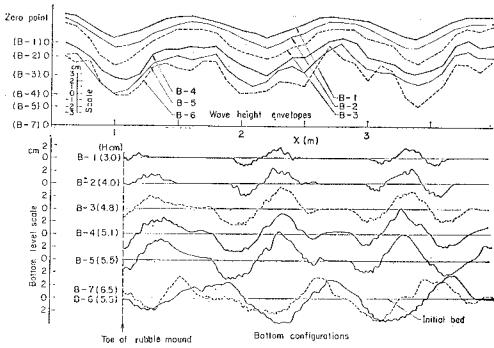


図-8 石炭粉を用いた場合の L 、 N -タイプの存在

また海底地形の堆積・欠陥の位相が、波高がある高さ以上になると完全に逆になっていることがわかる。すなわち波高の小さいときは、重複波の腹と節との中間に位置する海底が洗掘され、重複波の節の位置が堆積している。この傾向は $H_0=6.5\text{ cm}$ に増大するまで続き、波高が増すにつれて地形変化の位相はそのまま、上下の起床が増大している。しかし $H_0=6.5\text{ cm}$ に至ると、突然に地形変化の位相が逆になっており、重複波の節の位置で洗掘され腹の位置で堆積している。土量のバランスから考えて、 $H_0=5.5\text{ cm}$ 以下のケースは、明らかに重複波の腹と節との中間の底質が節の位置へ持って行かれていくことがわかり、前節の固定床実験における N -タイプの底質移動が生じている。逆に波高が $H_0=5.5\sim 6.5\text{ cm}$ と大きい場合は、底質が節から腹へ移動したことがわかり、 L -タイプの底質移動が生じている。このように、波高によって海底地形の変化が L 、 N -タイプという位相の全く逆のものになるという現象は、標準砂を用いた場合にもみられた。しかし、自然砂を用いた場合には、波高を $H_0=7\sim 10\text{ cm}$ まで上げてても N -タイプ移動による海底洗掘しか見ることができなかった。

結局重複波による

海底洗掘は、図-9に示すように典型的な二つのタイプに分けることができる。一つは N -タイプの底質移動により重複波の腹と節との中間が洗掘されて節へ堆

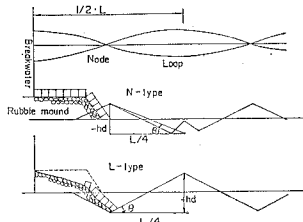


図-9 洗掘型式

積する場合で、これを N -タイプ洗掘と呼ぶ。今一つは L -タイプの底質移動により重複波の節で洗掘され腹で堆積する場合でこれを L -タイプ洗掘と呼ぶ。図-9に定義した洗掘タイプについて実験結果をプロットしたのが図-10である。図において縦軸は相対速度 u_b/w 、横軸は Ursell 数 U を示し、各プロット点に付してある数字は、図-9に示した洗掘斜面の平均勾配 $\tan \theta =$

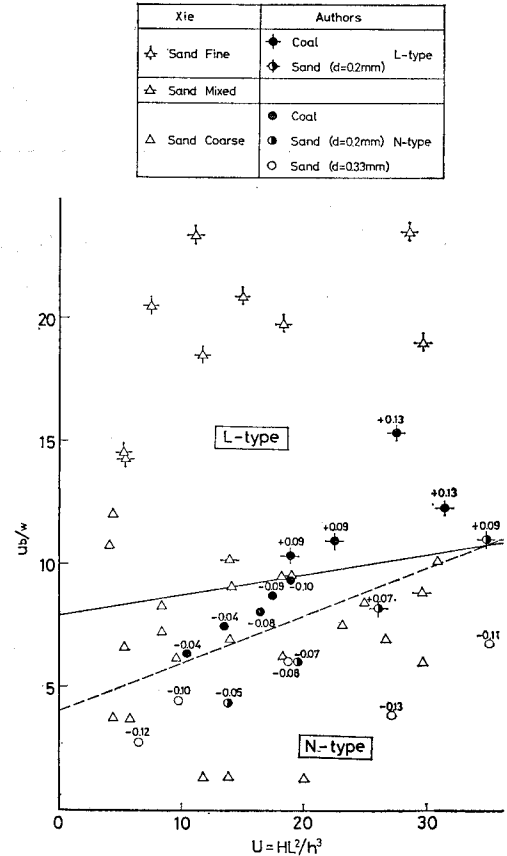


図-10 移動床における L 、 N -タイプの発生限界

$\pm(h_a)/(L/4)$ である。また同図には、Xie³⁾ が実施した実験結果も (Δ) 印にて示されている。Xie による「Fine」と L -タイプ洗掘とは同類のもので、ここでは各プロット点に十字印が付してある。一方「Coarse」は N -タイプ洗掘に相当し、プロット点に何も付していない。この結果をみると L 、 N -タイプあるいは「Fine」、「Coarse」のケースの発生限界が存在することがわかる。図中の実線は、これらの結果から総合的に判断して引くことのできる境界線を引いたものである。図中の点線は、図-7の人工粗度を有する固定床における L -タイプの発生限界を示したものである。移動床の場合は、固定床の場合ほど Ursell 数の影響が顕著ではないようである。しかし水粒子の相対速度 u_b/w については、 $u_b/w > 10$ であればすべて L -タイプが発生するものとみられ、これが L 、 N -タイプ洗掘の発生限界といえるようである。

L -タイプ洗掘は、通常施工されている防波堤捨石マウンド幅に対し著しい洗掘沈下をもたらすようである。図-11は、中央粒径 $d_{50}=0.14\text{ mm}$ の砂を用い平均捨石マウンド幅 10 m を用いて、模型縮尺 $1/75$ とし $H_0=5\text{ cm}$ 、 $T=1.16\text{ sec}$ の波を作用させたときの捨石マウンドの沈下状況を示したものである。洗掘型式は明らかに L -タ

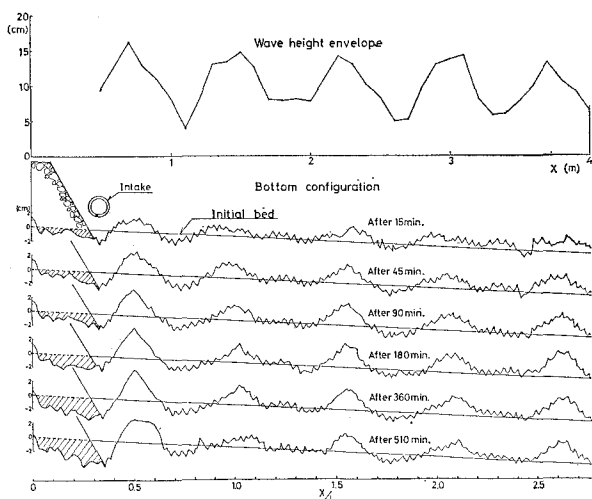


図-11 L-タイプ洗掘による捨石マウンドの沈下

イブ洗掘であり、重複波の節の位置での海底洗掘により捨石マウンドの下底質が吸い出され、沈下が進行しているのがわかる。この実験では、防波堤法線に沿う三次元的流れによる浮遊砂の損失の効果をj入れるため、図に示す位置で 0.2 l/sec の流量で吸水した。

4. 現地での防波堤前面の海底洗掘

図-13は、図-12に示す防波堤配置の場合の現地における

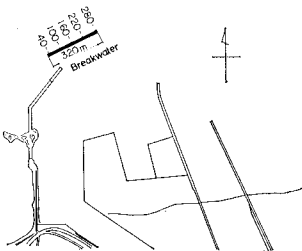


図-12 防波堤の配置

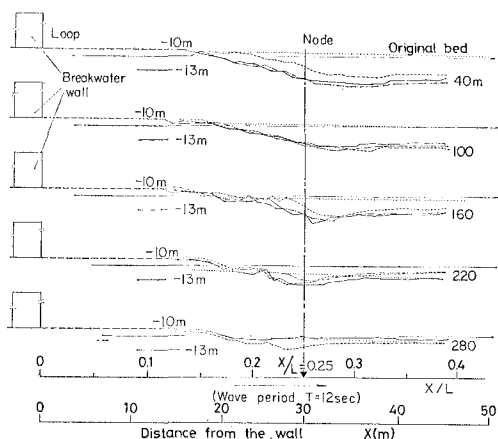


図-13 現地における洗掘断面の一例

防波堤前面洗掘の一例である。来襲波高としては、 $H=6\text{ m}$ 、 $T=12\text{ sec}$ と観測された。図から、防波堤前面より $L/4$ の位置の海底が最も洗掘され、洗掘型式としては L-タイプであることがわかる。現地での波浪は時々刻々変化するものであり、時化時の最大波高を直接あてはめて考えることに無理がある。しかし、現地では u_b/w が L-タイプ洗掘の発生限界 $u_b/w \approx 10$ をはるかに越えていること、大きな波のときが海底洗掘に対する影響も大きいことを考えあわせると、図-13は現地での洗掘が L-タイプ洗掘であることを示すものと思われる。

5. まとめ

- (1) 人工粗度を有する固定床、リップルを有する移動床における重複波の下での底質移動には、重複波の節から腹へ向かう正味の底質移動を示す場合とその逆の場合とがあり、前者の移動型式を L-タイプ、後者のそれを N-タイプと呼ぶ。
- (2) それらの底質移動型式に対応して、移動床では、重複波の節で洗掘されて腹で堆積する L-タイプ洗掘型式、および重複波の腹と節との間で洗掘され節の位置で堆積する N-タイプ洗掘型式がある。
- (3) L-タイプの洗掘は、 $u_b/w > 10$ の条件で発生する。N-タイプ洗掘は、それより小さな u_b/w の範囲で発生する。
- (4) 実際の防波堤前面では L-タイプが発生しているものと考えられる。したがって、 $u_b/w > 10$ が洗掘実験の再現性を高める条件といえる。
- (5) 通常施工されている防波堤の平均捨石マウンド長さは、荒天時の外洋波により発生する L-タイプ洗掘に対し不利な条件となる場合がある。

参考文献

- 1) Longuet-Higgins: Mass transport in water waves, Phil. Trans. of Royal Soc., London Series A, No. 903, Vol. 245, pp. 535~581, 1953.
- 2) 野田英明: 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, 1970.
- 3) Xie Shi-Leng: Scouring patterns in front of vertical breakwaters and their influence on the stability of foundations of the breakwaters, Technische Hogeschool, Delft (Netherlands), 61 p., September '81.
- 4) 入江 功・瀬岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次: 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘——底質の移動機構に着目した研究——, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, 3, pp. 3~52, 1984.