

魚礁周辺の局所洗掘とその対策工法について

榎 木 亨*・松見 吉晴**・北口 雅章***

1. ま え が き

魚礁の設置されている水域の底質は一般に砂質である場合が多い。そのため、魚礁周辺に生じる洗掘は魚礁の沈下埋没を誘発せしめ魚礁としての機能維持において重要な問題となっている。この魚礁周辺の洗掘については、底質が通常の波あるいは流れによる移動限界流速以下の底質条件であったとしても魚礁周辺に生じる渦流によって洗掘が進行することが著者ら¹⁾の先に行なった実験においても認められている。しかしながら、現在の魚礁設計においては、この魚礁周辺の局所洗掘に対して適切な防止工法が取り入れられるまでに至っていない。この防止工法を確立するためには、局所洗掘の進行に伴う魚礁周辺の地形の変動機構および変動範囲、さらには魚礁の変動状況（埋没、散乱）、埋戻し効果等に対する定量的な検討を十分に行っておく必要性がある。従って、本研究では、まず魚礁の安定設計において重要な資料となる魚礁周辺に発生する縮流渦流等に起因する局所洗掘の発生領域の明確化を図るとともに、洗掘機構および魚礁の沈下については移動床実験並びに流況可視化実験より主に砂移動と流況特性との関連性より検討を加え、ついで、その結果に基づいて提案する具体的な洗掘対策工法の効果を実験的に明らかにしようとしたものである。

2. 魚礁周辺の局所洗掘に関する実験

本研究では波浪流による振動流を作用させた場合の魚礁周辺の流況変化に起因する局所洗掘を対象とした。実験は大阪大学工学部土木工学科のU字管振動流発生装置を用いて行った。魚礁モデルは現在人工魚礁として数多く使用されている立方体型魚礁をとりあげ、一辺 $a=5$ cm の立方体魚礁モデルを採用した。また、その有孔性の効果については魚礁モデル各側面に正方形の孔を設けることにより体積空隙率 $\gamma=0, 31, 43, 65\%$ を示す4種類の魚礁モデルについて検討した。

局所洗掘の発生領域に関する実験については、本研究

において洗掘の発生領域を魚礁周辺の砂粒が1個でも移動する条件と定義していることから、U字管水槽の底部には対象とする砂粒を一樣にニス付けして粗度を与え、その上に一樣に砂を敷きならした。実験に使用した砂の粒径 d は 0.017, 0.033, 0.05 cm の3種類で、比重 ρ_s は 2.65 である。魚礁周辺に生じる洗掘の発生限界に関する表示は、前報¹⁾と同様に各魚礁モデルを設置した時の砂の移動限界時における主流流速 u_b^* と、魚礁モデルを設置しない場合の砂の移動限界時における主流流速 u_b^* との比を用いて検討することにした。そのための u_b^* および u_b^* を求める実験並びに算定方法の詳細については参考文献 1) を参照して頂きたい。

また、魚礁周辺の局所洗掘機構に関する実験は、U字管水槽底部に均一砂を厚さ 20 cm 程度に入れた移動床実験を行った。砂は粒径 $d=0.033, 0.05$ cm の2種類である。実験は整地した初期断面の上に魚礁モデルを設置し、90 分間振動流を作用させ、その間 15, 30, 60, 90 分における魚礁周辺の洗掘深および洗掘領域の時間変化を測定した。洗掘深は図-1に示す6点(A~F)で測定した。魚礁の沈下量については、水槽正面よりビデオ装置で録画した結果より読み取った魚礁上部正面の2隅の沈下量で代表させた。実験流速は砂の移動限界より小さい $K-C$ 数 $=10\sim22$ の範囲における3種類の場合について行った。振動流の作用時間を90分間に限定したことについては、 $K-C$ 数が大きい場合の洗掘深が定常に達する時間を基準にした。また、魚礁周辺の底部近傍の流況については、図-1に示すように水槽横断方向に底部から1 mm 程度の位置に張ったキンク状および直線の白金線より出る水素気泡でもって可視化し、それを魚

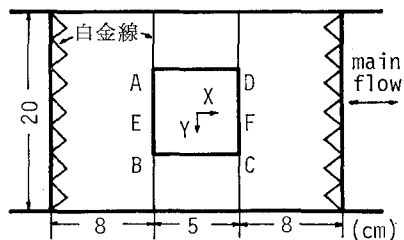
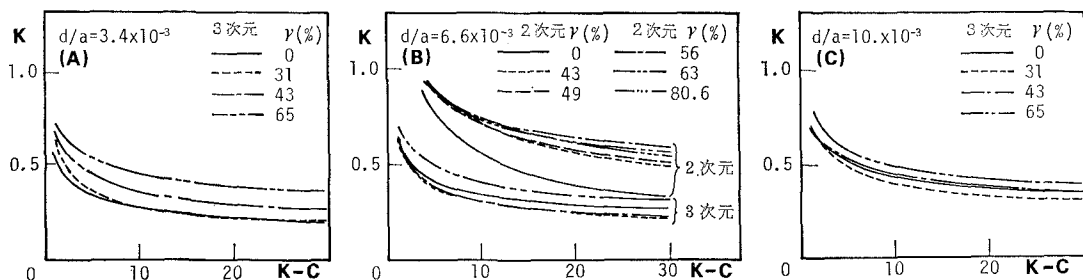


図-1 洗掘深の測定点および白金線の設置位置

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 鳥取大学助手 工学部海洋土木工学科

*** 正会員 工修 本四公団

図-2 移動限界流速低下率 K と $K-C$ 数の関係

礁モデル上方より 16mm シネカメラで撮影して求めた。

3. 魚礁周辺の局所洗掘について

3.1 局所洗掘の発生領域

砂の初期移動限界に対する判定には個人的な観測誤差が入り易いため、まず本実験で採用する砂の移動限界について従来の砂の初期移動限界式²⁾と無次元掃流力でもって比較検証した結果、魚礁を設置しない場合の実験結果と従来の砂の初期移動限界式との間に大きな差が認められなかった。また、魚礁を設置した場合の無次元掃流力については、魚礁を設置しない場合と同様に水粒子の水平方向移動距離の増加に伴って増大するが、その値は魚礁を設置しない場合に比べて小さい値を示した。このような結果より 3 次元洗掘においても 2 次元洗掘と同様に u_{*c} と u_{*c}^f との間には、次式で示すような関係式が成立するものと推定される。

$$u_{*c}^f = K \cdot u_{*c}$$

ここに、 K は u_{*c} の魚礁設置に伴う移動限界流速の低下率を表わし、魚礁空隙率 γ と砂の粒径 d および洗掘発生要因である渦流の表示に対して有効なパラメーターである $K-C$ 数に関連する係数である。

図-2 は各粒径ごとの各空隙率 γ における K を $K-C$ 数 (UT/D , $D=2a$) の変化に対応して示したものである。図中の各空隙率における K の曲線は最小二乗法より求めたもので、各曲線より上側の K の値では洗掘の発生が見られる。この図より魚礁設置に伴って洗掘を発生させる u_{*c}^f は、砂粒径および空隙率に関係なく $K-C$ 数 = 6 付近まで急激に低下し、それ以降 $K-C$ 数の増大に伴って徐々に減少しながら一定値に漸近する傾向を示す。しかし、本実験では $K-C$ 数が 30 以上の領域における K の値、特に潮流を対象としたような K の値については明らかではない。同図 (B) において 3 次元魚礁モデルの K の値が 2 次元の場合の K より小さい値を示していることと、また 2 次元モデルの洗掘が著者らの先の研究で明らかにしたように魚礁モデル背後に生じる水平渦流のみに起因することから、3 次元モデルの洗掘に対しては魚礁モデル周辺の縮流鉛直渦流が影響していると云えよう。また、 $\gamma=65\%$ の場合の K は、他の

空隙率の場合に比べていずれの粒径においても大きい値を示す。このことは、 $\gamma=65\%$ の魚礁モデルの孔が大きいために流れに対する遮蔽面積が他の空隙率モデルに比較して小さくなり、洗掘の発生要因である縮流渦流の強さが弱くなるためと推察されるが、十分な結論を得るまでに至っていない。

3.2 魚礁周辺の流況特性と洗掘形状の関連性

図-3 は可視化実験より得られた魚礁周辺の流況と砂移動を模式的に表わしたものである。図中実線は流れの様相を示し、破線が実験観察より得られた砂粒子の移動方向を表わしている。魚礁周辺の流況と砂移動との関連性については、魚礁前面に沿う下降流によって生じる水平渦流 A と縮流の相互作用により生じる外向きの流れ B に起因する砂移動 a , b 、さらには魚礁隅角部で発生する鉛直渦流 C による砂の巻き上げ c によって特徴づけられる。このようなことから洗掘形状は魚礁隅角部で逆円錐形の洗掘孔をもち、流れの逆転による洗掘孔の若干の埋戻しを伴いつつ、最終的に 図-3 の斜線部で示すように魚礁前面へ拡がるような形状を示す。魚礁隅角部で巻き上げられた砂の流下方向への移動距離は $K-C$ 数によって異なるが、大部分が魚礁側面に沈降し堆積域を形成する。また、図-4 に示すように魚礁周辺の地形変動の状況が、空隙率の違いによって異なることが実験の観測より認められた。すなわち、無孔モデルの場合は振動流を作用させると同時に魚礁隅角部から洗掘され始め、ついで少し遅れて魚礁前面の中央部付近も同様に洗掘されることから、図-4 (A) に示す各断面の地形が (B) に示すようになる。一方、有孔モデルにおいて特

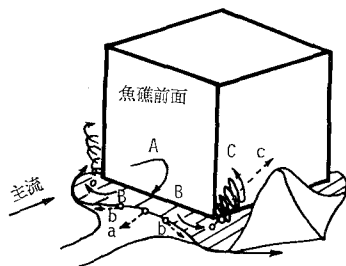


図-3 魚礁周辺の流況と砂移動の関係

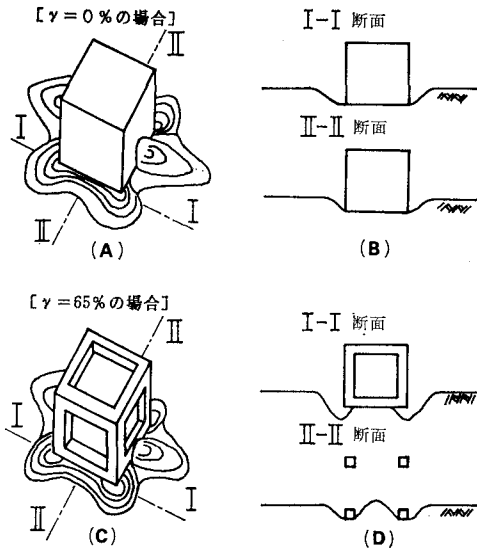


図-4 魚礁周辺の地形変動の模式図

に $\gamma=65\%$ の場合は無孔モデルに比して魚礁の流れに対する遮蔽面積が小さいことから魚礁前面に沿う下降流が弱く、この付近が洗掘されにくいため図-4(C)の各断面が(D)に示すような断面形状になる。この場合は洗掘の進行にともなって魚礁底面の孔から砂が入り込み、魚礁がその入り込んだ砂の山に乗るような状態になる。

3.3 洗掘深と魚礁の沈下量の関係

上述したように魚礁周辺の洗掘状況は魚礁空隙率によって異なることから、洗掘箇所の相異に基づく沈下状況も異なると考えられる。従って、本研究では魚礁周辺における洗掘深の代表値として魚礁隅角部で生じる鉛直渦流と縮流に起因する洗掘深 h_s (以下、隅角部洗掘深と称す) および魚礁前面に沿う下降流による魚礁底辺中央部の洗掘深 h_c (以下、中央部洗掘深と称す) と魚礁の沈下量の比較検討を行う。図-5 は空隙率 0% および 65% における 2 種類の洗掘深 h_s , h_c と魚礁の沈下量 Δh の時間変化を示したものである。なお、各時間における h_s および h_c の値は各測定位置 (図-1 の A, B, C, D 点と E, F 点) の洗掘深を平均したものである。 $\gamma=0\%$ の場合の h_s および h_c と Δh は K-C 数に関係なく洗掘初期からほぼ一致するようになる。一方、 $\gamma=65\%$ の場合、特に K-C 数=21.95 においては h_s と Δh との間に大きな差が生じるが、 h_c と Δh の時間変化はほぼ等しい値を示していることが認められる。このような結果について上述した空隙率変化に伴う洗掘現象の違いより考察すると、 $\gamma=0\%$ の場合は洗掘が隅角部から前面までほぼ同程度に進行することから、魚礁は底面全体を砂層に接しながら沈下するが、 $\gamma=65\%$ の場合は魚礁前面に沿う下降流が $\gamma=0\%$ の場合に比較して弱いた

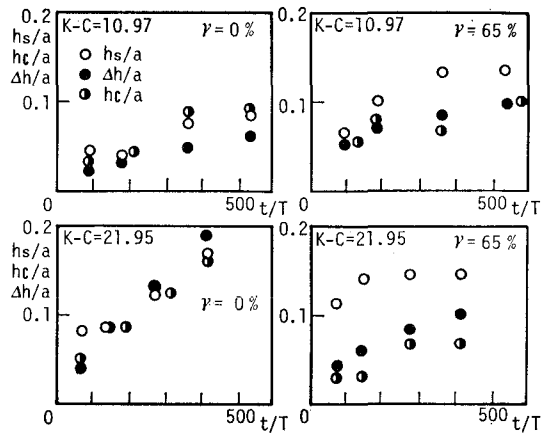


図-5 洗掘深および魚礁の沈下量の時間変化 ($d=0.033$ cm)

め図-4(D)に示すように底辺中央部の洗掘が隅角部での洗掘に比べ浅くなり、魚礁は隅角部を浮かして沈下することがわかる。従って、魚礁の沈下量の大きさに対しては魚礁の空隙率に関係なく魚礁底辺中央部付近における中央部洗掘深によって決定づけられると云えよう。

また、測定時間内における魚礁の最大沈下量 Δh_m および最大隅角部洗掘深 h_{sm} は図-5においても明らかに K-C 数によって変化する。図-6 は各空隙率における Δh_m および h_{sm} の K-C 数変化を示したものである。 $\gamma=0$, 31% の h_{sm}/a は K-C 数の増大に伴って大きくなるが、K-C 数=16, 21 では等しくなる傾向が認められる。一方、 $\gamma=65\%$ の h_{sm}/a は K-C 数変化による顕著な変動が認められず、K-C 数が小さい場合は $\gamma=0$, 31% の h_{sm}/a より大きい値を示す。このことについては次のように考えられる。すなわち、 $\gamma=0\%$ の場合は K-C 数の増大に伴って渦の流下距離が増加し、魚礁隅角部で巻き上げられた砂による洗掘孔の埋戻し効果のために K-C 数 16 と 21 での h_{sm}/a の間に大きな差が生じなかったと考えられる。また、 $\gamma=65\%$ の

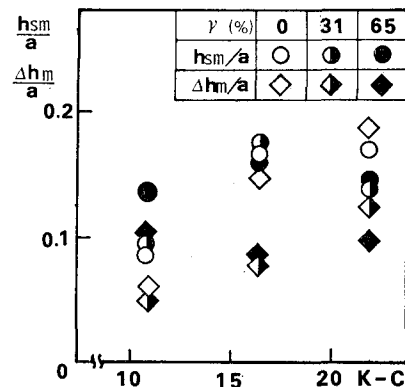


図-6 最大洗掘深および最大沈下量の K-C 数変化 ($d=0.033$ cm)

魚礁モデルは各側面に設けた孔が広いために細い角柱部材からなる構造となり、この部材の幅を K-C 数の代表長にとると K-C 数は大きくなり渦流の発生頻度の増大を意味することから、 $\gamma=65\%$ の h_{sm}/a が他の空隙率に比して大きく生じたと考えられる。一方、図-6 より魚礁の沈下量の K-C 数変化については、 $\gamma=65\%$ の場合は上述したように流れに対する遮蔽面積がかなり小さいために沈下量を左右する中央部洗掘深に寄与する下降流が K-C 数変化の影響を受けにくいことから、 $\Delta h_m/a$ に対して K-C 数変化に伴う顕著な変動が現われてないのがわかる。

洗掘領域については、魚礁中心から洗掘領域までの最大水平距離でもって定義した場合、各空隙率モデルにおけるその距離には大きな差異が認められなかった。また、魚礁隅角部での洗掘孔の勾配を隅角部洗掘深と洗掘領域までの距離より計算したところ砂の水中安息角より小さい値を示し、河川における橋脚周辺の局所洗掘のように洗掘領域が洗掘深と砂の水中安息角との関係で一義的に決定されないことがわかった。このことから洗掘領域と洗掘深との関係については、洗掘に伴う魚礁の沈下および魚礁周辺の流況変化などと結び付けて考える必要がある。

4. 洗掘対策工法

上述したように魚礁周辺の局所洗掘は魚礁周辺に生じる縮流渦流によって生じることから、洗掘対策工法としては魚礁形状の改良により縮流渦流の発生の軽減を行えばよいが、魚礁の集魚効果の面からこの方法では逆効果になる恐れがある。ここでは、底質の掃流抵抗の増大を図る捨石工法と洗掘発生の要因である縮流渦流と底質との遮断を目的とした「つば」を魚礁底面に付着させる工法について検討した。なお、前者の対策工法の場合は、まず河川の橋脚周辺の洗掘に関する研究⁹⁾においてよく知られているアーミング効果が振動流においても認められるか否かについて混合砂実験で確認し、ついで底質

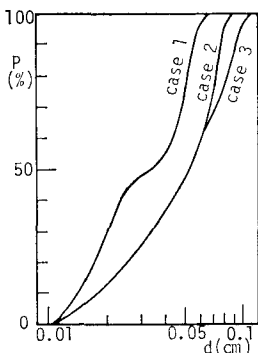


図-7 実験砂の粒径加積曲線

として均一砂を用いた検証実験を行った。また、「つば」には「つば」の付着に伴う二次洗掘の誘発を避けるため柔軟性のあるゴム性シートを採用することにした。

混合砂実験は、図-7に示すような粒径加積曲線をもつ3種類の底質材料について行った。なお、粒度構成の代表値と

して中央粒径 d_{50} は 0.033 cm (case 1), 0.05 cm (case 2, 3), 粒度分布の標準偏差 $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ がそれぞれ 1.85, 1.87, 2.03 である。

図-8 は混合砂実験における最大隅角部洗掘深 h_m と均一砂の場合の h_{sm} の比を K-C 数の変化に対応して示したものである。 $\gamma=65\%$ の h_m/h_{sm} は K-C 数に関係なく 1 より小さい値を示し、振動流中においてもアーミング効果が認められるが、 $\gamma=0\%$ の場合は K-C 数の増大に伴って h_m/h_{sm} が減少傾向を示し、アーミング効果に K-C 数が関係することがわかる。このことについては、次のように考えることができる。すなわ

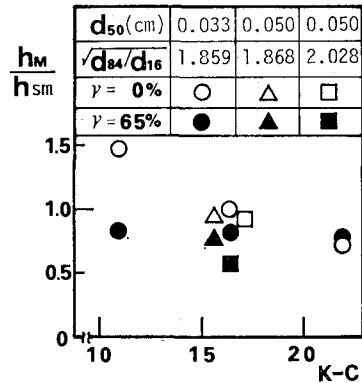


図-8 混合砂と均一砂における洗掘深の比較

ち、K-C 数の小さい場合については、魚礁隅角部での鉛直渦流により巻き上げられた砂の中の大きい砂粒径は渦の流下距離が短いことと、沈降速度が速いために魚礁側面付近に堆積し、大きい砂粒径による洗掘孔の埋戻しの可能性が少なくと推察され、そのために洗掘孔における粗粒化が進まずに均一砂の結果に比べ洗掘深が大きく生じたと考えられる。従って、振動流中のアーミング効果については、上述したように埋戻しの効果と密接に関係づけられるようである。

洗掘深の低減に対する混合砂の最大粒径の影響について明らかにするため、混合砂の最大粒径として図-7に示した粒度加積曲線の 90% に対応する d_{90} の違いによる各空隙率の洗掘深 h_m の変化を示したのが図-9である。この図より h_m は空隙率の区別なく d_{90} が大きいほど低減されて、洗掘対策工法として上記した捨石工法の効果が期待できることがわかる。

洗掘対策工法の効果に関する検証実験は次の3種類の対策工法について行った。

I: 捨石を円形に敷き詰めた上に魚礁を設置する

II: I + 魚礁周辺に捨石を施す

III: 魚礁底部に円形のゴムシートを付着させる

対策工法 II については、対策工法 I では魚礁の動揺による捨石の締固めから魚礁の沈下が予測できるので、魚

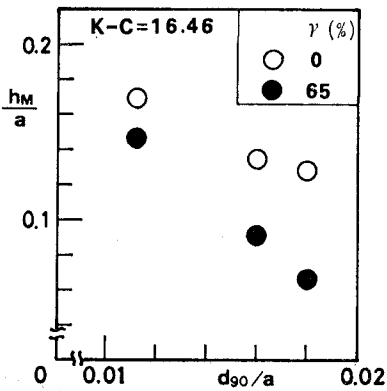


図-9 洗掘深の低減に対する最大粒径の効果

礁の動揺を軽減することを目的とした捨石を魚礁周辺へ付加したものである。なお、対策工法を施した領域は上述した均一砂の移動床実験における洗掘領域の大きさに基づいて決定した。図-10 は 3 種類の洗掘対策工法の効果を検証するために、各対策工法を施した場合の魚礁の沈下量 Δh_p と施していない場合の均一砂における沈下量 Δh_m との比較結果を示したものである。各洗掘対策工法の効果については、いずれの場合も $\Delta h_p/\Delta h_m$ が 1 より小さい値を示し、特に「つば」による洗掘防止効果が大きいことが認められる。また、対策工法 I と II を

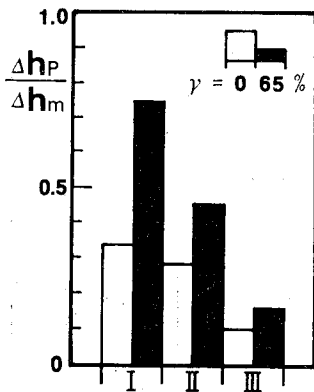


図-10 洗掘対策工法の効果の検証結果

比較すると対策工法 II の効果の方が優り、魚礁の動揺を軽減することにより捨石の締固めに伴う沈下をある程度防ぎうることが確認できる。

上述した洗掘対策工法の実用性について、現在のコンクリート製魚礁ブロックの設置方法の大部分が海上投入であることも考慮して検討を加えると、まず捨石工法は施工水深の増大に伴う捨石の散らばりおよび捨石領域への魚礁の正確な設置に問題を残す。また、「つば」の工法では「つば」が砂層面に接するような魚礁設置法の開発が今後の問題となる。

5. 結 語

以上本論文においては波浪流による魚礁周辺の局所洗掘を対象として、まずその洗掘の発生領域の区分別けを明確にし、洗掘機構については主に魚礁周辺の流況特性より各渦流と洗掘位置の関係を明らかにした。しかし、振動流の洗掘現象の特徴である洗掘孔の埋戻し効果の定量的な影響については、砂の移動の要因である渦流の強さおよび流下距離よりさらに検討を行う必要がある。また、本研究で提案した洗掘対策工法については、特に「つば」による対策工法の有効性が認められたが、その適用範囲については明らかでなく、今後この点も考慮して潮流場での洗掘防止効果並びにアーミング効果についても検討を加えたいと考えている。最後に本研究は文部省科学研究費（自然災害特別研究 I）による研究成果の一部であることを付記しておくとともに、本実験を行うにあたり協力していただいた大阪大学大学院橋本敏和君に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 横木 亨・松見吉晴：魚礁背後の水平渦流による地形変動機構について、第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 288～291，1983。
- 2) 例えば，Komar, P. D. and M. C. Miller: Sediment Threshold under Oscillatory Wave, 14th Conf. Coastal Eng., pp. 756～775, 1974。
- 3) 中川博次・鈴木幸一：局所洗掘に及ぼす混合砂礫の効果について，京大防災研究所年報第 18 号 B，pp. 689～700, 1975。