

氏名	田中仁
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和59年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	波・流れ共存場の乱流構造と漂砂現象に関する研究
指導教官	東北大学教授 首藤 伸夫
論文審査委員	東北大学教授 首藤 伸夫 東北大学教授 岩崎 敏夫 東北大学教授 佐藤 敦久 東北大学教授 小林 陵二

論文内容要旨

古い時代より沿岸域は、水産・交通運輸の場として人類の活動と密接な関係を持ち続けて来た。特に、四方を海に囲まれた我が国においては、その点が顕著である。加えて、近年においては、経済活動の多くが沿岸域に集中し、ますます海岸の保全・防災が重要な課題となりつつある。

一般に、海浜といえは、陸上の砂浜から沖側の砂れきの移動の止む地点までの領域を指している。砂が動かなくなる限界での水深を、移動限界水深と呼び、これより浅い領域において砂れきの運動が起こる。

海浜における砂移動形態は、便宜的に汀線に平行な方向の漂砂（沿岸漂砂）、汀線に直角方向の漂砂（岸沖漂砂）に分けられる。両者は互いに密接な関係を持つものであるが、現象が複雑であるため便宜的に分離して取り扱われてきた。このうち、沿岸漂砂については入射波の沿岸方向エネルギーと結び付けて定式化されており、すでに海浜変形予測に応用されている。一方、岸沖漂砂については実用に供し得る漂砂量公式は未だ提案されていないが、従来、底面に作用するせん断力と関連付けようとする研究例が多い（例えば、Madsen & Grant (1976)あるいはShibayama & Horikawa (1980)）。波のみの場合の壁面摩擦力については、Jonsson (1966), Kajiura (1964, 1968), Riedel et al. (1972)等により摩擦係数の算定式が提案されており、実用的にはほぼ問題のない段階に達している。これらの壁面せん断力に関する研究に力を得て、先の岸沖漂砂量定式化の試みが成されて来たと言える。

一方、河口や砕波帯のように波と流れが共存する場における砂移動については、その重要性にもかかわらず研究例すらほとんど無いのが実情である。この原因のひとつとして、砂移動の外力となる底面摩擦力に関する情報がほとんど未知であり、定常流における対数則、波動場における Jonsson の式に比肩する抵抗則が存在しないことが挙げられる。

波・流れ共存時の抵抗則を扱ったものとしては、Smith(1977)、Grant & Madsen(1979)の研究がある。前者は波と流れの交差角が0度の場合のみを対象としており、また壁面応力を摩擦係数の形でまとめていないため、実用的なものではない。一方、Grant & Madsen(1979)の理論では、任意の角度で交わる波と流れを扱っており、さらに抵抗則を摩擦係数の形で表現している。ただし、解析対象は粗面乱流の場合のみであり、また渦動粘性係数の接続方法、定常流速成分の物理的意味に明確さを欠く点が難点である。

本論文においては以上の事実を踏まえ、まず波・流れ共存場の抵抗則に関する研究を行った後、この抵抗則を用いて砂移動現象の説明を試みた。

本論文は全8章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、本研究の位置付けを明確にするために、過去の振動流研究の経緯について簡潔に記した。

第3章では、層流時および乱流時の波・流れ共存場摩擦係数を理論的に導いた。理論解析では波と流れが任意の交差角で交わるものと考え、一般的な三次元的現象として取り扱っている。乱流解は、Kajiura(1964)と同様な渦粘性係数モデル(一層モデル)を用いることにより得られている。本モデルは Prandtl の混合距離理論を波・流れ共存場へ拡張したものである。渦動粘性係数は時間的に変化しないものと仮定し、壁面から水表面まで直線分布するとした。この仮定を境界層方程式に代入することにより、波・流れ共存時の流速分布、せん断力分布、摩擦係数等が得られる。摩擦係数は4つの無次元パラメータを用いて表示される。本研究で得られた摩擦係数算定式において、波動成分および定常成分をゼロと置いた場合、計算結果は従来の流れのみ、あるいは波のみの場に対して得られている算定式と矛盾しない。従って、ここに得られた波・流れ共存場摩擦係数は極めて合理的な関数形を有していると言える。粗面を対象とした理論で、粗度長さを粘性底層厚に置き換えることにより、滑面時の理論が得られる。波・流れ共存時の粘性底層厚については不明な点が多いが、ここでは時間的に厚さが変化しないものと仮定した。滑面時の摩擦係数もやはり4つの無次元パラメータによって記述される。ただし、粗面・滑面いずれの場合にも摩擦係数は複素ベッセル関数、複素ノイマン関数により表現されており、さらに摩擦係数がベッセル関数、ノイマン関数の引数中に含まれているため、表示式は極めて複雑な陰関数形式になっている。従って、厳密解のままでは摩擦係数の算定に複雑な計算を要し、実用上望ましくない。そこで、ベッセル関数、ノイマン関数を漸近展開、あるいは級数近似することにより、摩擦係数に関する近似式を導いた。近似解を厳密解と比較したところ、両者の差は無視できる程度であり、近似式の精度は十分であると判断された。

一層モデルは渦動粘性係数が直線分布すると仮定した点、渦動粘性係数が時間的に不変であると

した点で現実の流れの性質とく違っている。後者の点についての改善は現段階では困難である。二層モデルを用いることにより、前者の問題点を克服することができる。このモデルは定常乱流境界層に対する Mellor & Gibson(1966) の理論を波・流れ共存場に拡張したものである。二層モデルを用いて得られる結果と、先の一層モデルによる結果とを比較したところ、両者には有意な差は認められなかった。従って、摩擦係数に対する近似式が得られている一層モデルの方が実用的であると言える。

第4章では、波・流れ共存場の流れの性質、すなわち壁面の粗・滑および層流・乱流を判別するための判定基準を定めた。その際、前者の識別条件は定常流に対して得られているものをそのまま準用した。また、乱流遷移条件は実験的に求めた。実験には全長4 m、高さ1.5 m、幅5 cmの風洞装置を用いた。実験の結果、流れの様子は大きくわけて、層流状態、高周波の乱れを伴う乱流、および低周波の乱れを伴う乱流の3種類に分類できることがわかった。また、これらの発生限界を表わす簡便な実験式が得られた。これらの結果を用いることにより、境界層の性質の判定が可能となり、第3章の摩擦係数と併用することにより、任意の水力条件・底質条件での底面せん断力を算定することができる。

第5章では、先に第3章で導かれたモデルの妥当性を検証するために風洞装置を用いて、渦動粘性係数、平均流速分布、乱れ強度、壁面せん断力の測定を行った。実験に用いた風洞はアクリル製であり、10 cm×15 cmの矩形断面を有する。全長は12 mである。その結果、渦動粘性係数は時間的な変化を示すものの、二層モデルにおける仮定に近い分布を有することがわかった。特に、振動流成分に比べ定常流成分が卓越するケースでは、渦動粘性係数はほとんど時間的な変化を示さず、著者の仮定の妥当性が示された。平均流速については、著者のモデルによりほぼ満足の行く予測値が得られた。底面せん断力については、最大で20%程度の誤差を伴うことが判明した。また乱れは減速期(逆圧力勾配位相)に爆発的に発生することが認められた。著者のモデルでは乱れ強度に関する情報は全く得られないが、無次元圧力勾配パラメータを用いることにより、乱れの発生位相を予測することが可能となった。

以上、第3章から第5章で対象とする流れは滑面上、あるいは一様に敷きつめられた粗度上の流れである。この様な壁面上の流れは、波と流れの共存する場の基本的な性質を知る上で、まず第一に検討されるべき対象である。この様な観点に立って以上の研究が行われた。しかし、現実の海浜あるいは河口の様に移動床を有する流れにおいては、往々にして砂レンと呼ばれる砂の波が発生し、平坦な河床のままではいることは極めて稀である。波動運動に伴い砂レン頂からは周期的な渦の放出が見られる。従って、波状曲面上の乱流構造・底質移動機構は平坦床上のそれと大きく異なることが予想される。そこで、第6章ではまず、波・流共存場に移動床底面に形成される砂レン形状算定式を提案した。本章で得られた式は先の摩擦係数式と同様に、波のみ、あるいは流れのみの場に対する既往の研究成果と矛盾することがない。次に、砂レン近傍の基本的な流れの構造を知るために、砂レンを模した波状曲面を風洞内に設置し、詳細な乱流計測、および流れの可視化を行った。実験に先立ち、まず開水路において予備実験を行い、その時の条件と全く相似な運動を風洞内に再現した。実験には熱線流速計のX形プローブを用い、鉛直・水平の2方向流速成分を測定している。流

れの可視化にはスモーク・ワイヤー法を使用した。その結果、壁面より遠方ではほとんど戻り流れがない場合でも、砂レン模型の極く近くでは、はく離渦の効果により強い逆流が存在していることがわかった。この流れは強い乱れを伴っており、底質浮遊の支配的要因になっていることが予想される。今後、この様な渦運動と底質移動との関連性を知ることが課題である。今回はその第一段階として渦の定量化を行った。渦強度の評価には循環を用いた。その結果とポテンシャル理論を組み合わせることにより、流れの場の再現を行った。モデル中には2, 3の実験定数が含まれているものの、係数を適当に選べば、比較的良好な理論値が得られる。

第7章には、福島県鮫川河口で行われた現地観測結果を示した。観測は昭和55年から昭和57年まで毎年秋に行われた。初年度には河口の水理観測のみを行い、砂移動に関する観測はしていない。昭和56年、昭和57年には水理観測と並行して砂レンスケールおよび流砂量の測定を行った。水理観測には二方向電磁流速計および容量式波高計を用いた。これらの計器を鉄パイプ製のヤグラに取り付けた後、河口に設置した。砂レン測定には櫛状の器具を使用した。また、流砂量測定には吹き流し型とバケット型の2種類の捕砂器を用いた。水理観測の結果、粗度長さ、粗度係数等の時間的変化をとらえることができた。また、河口部の乱れについても興味深い結果が得られた。特に、今回測定を行った鮫川の様に向きの異なる流れが河口部付近で合流する場合には、乱れは底面境界のみならず水表面からも発生することわかった。河口に形成される砂レンは、室内実験で得られるものと比較して、かなり大規模なものであった。また、河口における流砂量を波・流れ共存時の摩擦係数を用いて定式化することができた。しかし、ばらつきはかなり大きい。この原因としては測定精度もさることながら、流砂量を単に壁面せん断力と結び付けようとする考え方にも問題がある。先の風洞実験で明らかになった様に、砂レン頂からは一周期毎に高乱れ強度を伴う渦が放出されている。このような渦運動に伴う底質移動機構を解明することによって、より精度のよい流砂量則が得られるものと考えられる。その際、浮遊砂濃度の評価には、第6章に記した循環値がその一助になるものと期待される。本論文ではそのような方向からの流砂量定式化を行うまでにはいたらず、問題の提起、アプローチ方法の可能性の提言に終わった。

審査結果の要旨

河口部および砕波帯における砂移動現象の解明は、河口処理や海岸浸食対策にとってきわめて重要であるにもかかわらず、いまなお数多くの問題が未解決のまま残されている。砂を動かす水の運動が複雑であり、一方砂移動の影響がまた水の運動にはねかえっていくという、強い干渉効果があるからである。砂移動を表現する際の基本量ともいべき底面摩擦力さえ、その評価の方法が確立されていなかった。

本論文は、こうした問題の解決をはかるもので全篇8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、波のみが存在する場合についての過去の研究をとりまとめ、問題のありかを明確にしている。

第3章では、波・流れ共存時の底面境界層での層流解、乱流解をえている。乱流解では、渦動粘性係数が底面からの距離に比例する1層モデル、さらにその上に一定値の層を考える2層モデルを作成した。両モデルによる底面摩擦力は大差なく、実験値と良い一致をしめた。

第4章では、実験により波・流れ共存下での乱流発生条件をあきらかにした。境界層内の層流乱流の別、底面の滑面粗面の判別が可能となった。第3章の結果と組み合わせて、摩擦係数の算定のための図表が作成された。これは実用上きわめて重要な結果である。

第5章では、平坦な面上での波・流れ共存場の乱れの構造についての詳細な実験がおこなわれている。理論によりえられる圧力勾配パラメータによって、乱れの発生する位相が予測される。浮遊砂の拡散を支配する条件をもとめるための有用な結果である。

第6章は、砂床波とその周辺の水の運動に関する研究である。砂連の発生条件・形状寸法が、摩擦係数を支配するのと同じパラメータによって表示されることをしめた。ついで、代表的な形状をもつ砂連をとりあげ、砂連斜面上での渦の発生とその放出を理論および実験によりしめし、特に浮遊砂の移動方向を決定する要因であることを明らかにした。

第7章は、現地観測の結果をとりまとめたものである。流砂量を第3章の理論よりえられるシールズ数によって表現している。これは河口部に対して初めて提案された流砂量公式であり、有用な成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、波・流れ共存時の底面境界層の理論を展開し、その結果を利用して砂移動現象を定量的に評価する方法をしめたもので、水理学および土木工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。