学位論文題名

波浪制御構造物近傍の乱流構造と局所流体力に関する研究

学位論文内容の要旨

ケーソン式混成堤(以下、混成堤と記す)は、我が国の防波堤の主たる構造様式であり、これまでに多くの研究と伴に実海域における実績が積み重ねられてきた。その結果、現行設計法の範疇では混成堤に関する設計手法は概ね確立されていると考えられているが、混成堤の被災は近年減少しているもののほぼ毎年発生している。被災原因を分析した結果、混成堤堤頭部における局所洗掘やマウンド被覆材の散乱が、防波堤の被災パターンの中で大きな割合を占めている被災原因のひとつであることが知られている。これまでに、堤頭部マウンド被覆材の安定性に注目した研究や防波堤堤頭部の局所洗掘に関する研究等があり、被災原因として構造物角部底面近傍における局所流の発生が指摘されている。しかしながら既往の研究では、被覆材の所要質量や洗掘深等の定量的な評価に重点がおかれ、混成堤堤頭部周辺における流速場の時空間変動特性について詳細に調べた例はほとんど無い。混成堤堤頭部近傍では複雑な3次元流速場が形成されていると考えられ、より信頼性、経済性の高い防波堤を設計するためには、その構造の解明が必要である。さらに、混成堤マウンド被覆材の設計に関して、現行設計法で用いられているハドソン式は、実用的であり、実際の設計で数多く用いられているが、算定精度等に関するいくつかの問題点が指摘されている。したがって、今後の信頼性設計法や性能設計法等への移行を考慮すると、高度な設計手法に対応した新たな所要質量算定法の構築が必要不可欠となる。本論文では、最初に3次元 Large Eddy Simulation により矩形堤堤頭部近傍の流速場をシミュレートし、主として渦の時空間変動に着目して、堤頭部近傍流速場の基本的な構造を明らかにした。つぎに、数値計算結果から被覆材の所要質量を算定し、現行設計法であるハドソン式による結果との比較を行った。その結果、数値計算による流速データに基づいた被覆材所要質量算定法が、被覆材の耐波安定性を判定する新たな計算手法の枠組みとなる可能性を強く示唆することができた。さらに、被覆材の所要質量を算定する場合、従来の算定法では慣性力の寄与は無視されているが、堤頭部近傍では流速と共に加速度も増幅され、慣性力を無視できない場合があることを明らかにした。以上の被覆材所要質量に関する検討に加え、本論文では数値計算結果と水理模型実験により局所洗掘に関する検討も行っている。その結果から、堤頭部近傍の局所洗掘が時間と共に進行する様子や入射波周期による洗掘・堆積形状の相違を明らかにした。さらに、数値計算を用いて算定した様々な水理量と洗掘位置や洗掘規模との相関を調べ、堤頭部近傍の地形変化は、最大底面せん断力、最大加速度

および最大速度等の瞬時量を表す水理量との相関が比較的高く、局所的な底質の巻き上げには瞬時量、非定常性を表す水理量の寄与があることが示された。

一方、港湾施設の多目的利用の観点から、比較的小規模な港湾—マリーナや漁港—で、港内静穏度の向上や航走波等の港内発生波に対する対策が求められている。そのためには、既往の構造物では対応し得ない、高機能低コスト、環境に優しいなどの社会的要請に応じた新たな構造物の開発が必要である。また、近年、波浪制御効果を向上するために構造形状や消波メカニズムがますます複雑になる傾向にあり、構造物の波浪制御特性を的確に評価し、経済性ならびに信頼性の高い構造物を開発していくためには、構造物近傍の局所的な流体運動のメカニズムを解明する必要がある。ところが、比較的単純な構造物に関しても、構造物近傍の局所的な流体運動特性が明らかにされていない場合が多い。本論文では、最も簡単な構造体の一つとして薄板に着目した。薄板を水平に没水させた構造物（以降、没水平板と記す）の場合、暴浪時の主たる波浪制御効果は板上での強制碎波によるものと考えられるが、通常は水平板端部からの渦の形成が波浪制御や周辺環境に大きく影響すると考えられる。しかしながら、没水平板による波の分裂、消波性能および波力特性に関する研究は多いものの没水平板周辺の詳細な流れの構造はほとんど解明されていない。そこで、Navier-Stokes 方程式に基づいた数値計算により、波動場における没水平板周辺の詳細な流れの構造をシミュレートし、主に渦運動に着目して流れの基本的な性質を解明した。その結果、没水平板端部から発生した渦が移流し、次の周期で発生した渦と干渉する様子や形成される渦の規模などが明らかとなった。例えば、入射波条件によっては、形成される渦の規模が小さくても渦が移流して底面近傍まで達する場合があり、局所洗掘の原因となり得ることが示された。一方鉛直板の場合、鉛直板単体の構造としては、その波浪制御特性や先端部からの剥離渦等の流れの様子が古くから研究され、カーテン・ウォール型防波堤として実海域でも適用されている。また、最近では多重の鉛直板構造や他の構造体との組合せによる波浪制御特性について研究されるなどその応用例もいくつか見られる。それらの中で、矩形浮体と鉛直板を組合せた複合構造（以降、ダブルバリア型浮体と記す）に対する消波性能について研究された例もあるが、実海域で適用するには十分な知見が得られたとは言えない状況である。そこで、ダブルバリア型浮体の消波特性、動揺特性および構造物周辺の流れの様子を水理模型実験と数値計算の併用により詳細に検討した。なお、ダブルバリア型浮体は、マリーナや漁港での浮き桟橋や作業ヤードに高い防波機能を持たせ、多目的構造物として利用することを想定している。水理模型実験と数値計算から、ダブルバリア型浮体は、二重鉛直板による剥離せん断流の形成によってエネルギー損失効果が増大し、広範な周波数領域で高い消波機能を有することを示した。また、浮体幅波長比 $B/L \geq 0.2$ では二重鉛直板の効果により浮体の鉛直運動が著しく低減することが明らかとなった。この特性は、平常時に作業ヤードやビジター・バースとして利用する際に有利である。さらに、ポテンシャル理論に基づくダブルバリア型浮体の消波特性および鉛直動揺特性の簡易算定法を構築し、エネルギー損失モデルを付加することで定量的な推定精度を向上させた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 教 授 長 谷 川 和 義
副 査 助 教 授 山 下 俊 彦

学 位 論 文 題 名

波浪制御構造物近傍の乱流構造と局所流体力に関する研究

ケーソン式混成堤（以下、混成堤と記す）は、我が国の防波堤の主たる構造様式であり、これまでに多くの研究と伴に実海域における実績が積み重ねられてきた。その結果、現行設計法の範疇では混成堤に関する設計手法は概ね確立されていると考えられているが、混成堤の被災は近年減少しているもののほぼ毎年発生している。被災原因を分析した結果、混成堤堤頭部における局所洗掘やマウンド被覆材の散乱が、防波堤の被災パターンの中で大きな割合を占めている被災原因のひとつであることが知られている。混成堤堤頭部近傍では複雑な 3 次元流速場が形成されていると考えられ、より信頼性、経済性の高い防波堤を設計するためには、その構造の解明が必要である。さらに、混成堤マウンド被覆材の設計に関して、現行設計法で用いられているハドソン式は、実用的であり、実際の設計で数多く用いられているが、算定精度等に関するいくつかの問題点が指摘されている。したがって、今後の信頼性設計法や性能設計法等への移行を考慮すると、高度な設計手法に対応した新たな所要質量算定法の構築が必要不可欠となる。本論文では、最初に 3 次元 Large Eddy Simulation により矩形堤堤頭部近傍の流速場をシミュレートし、主として渦の時空間変動に着目して、堤頭部近傍流速場の基本的な構造を明らかにした。つぎに、数値計算結果から被覆材の所要質量を算定し、現行設計法であるハドソン式による結果との比較を行った。その結果、数値計算による流速データに基づいた被覆材所要質量算定法が、被覆材の耐波安定性を判定する新たな計算手法の枠組みとなる可能性を強く示唆することができた。さらに、被覆材の所要質量を算定する場合、従来の算定法では慣性力の寄与は無視されているが、堤頭部近傍では流速と共に加速度も増幅され、慣性力を無視できない場合があることを明らかにした。以上の被覆材所要質量に関する検討に加え、本論文では数値計算結果と水理模型実験により局所洗掘に関する検討も行っている。その結果から、堤頭部近傍の局所洗掘が時間と共に進行する様子や入射波周期による洗掘・堆積形状の相違を明らかにした。さらに、数値計算を用いて算定した様々な水理量と洗掘位置や洗掘規模との相関を調べ、堤頭部近傍の地形変化は、最大底面せん断力、最大加速度および最大速度

等の瞬時量を表す水理量との相関が比較的高く、局所的な底質の巻き上げには瞬時量、非定常性を表す水理量の寄与があることが示された。

一方、港湾施設の多目的利用の観点から、比較的小規模な港湾—マリーナや漁港—で、港内静穏度の向上や航走波等の港内発生波に対する対策が求められている。また、近年、波浪制御効果を向上するために構造形状や消波メカニズムがますます複雑になる傾向にあり、構造物の波浪制御特性を的確に評価し、経済性ならびに信頼性の高い構造物を開発していくためには、構造物近傍の局所的な流体運動のメカニズムを解明する必要がある。本論文では、最も簡単な構造体の一つとして薄板に着目した。薄板を水平に没水させた構造物（以降、没水平板と記す）の場合、暴浪時の主たる波浪制御効果は板上での強制砕波によるものと考えられるが、通常は水平板端部からの渦の形成が波浪制御や周辺環境に大きく影響すると考えられる。そこで、Navier-Stokes 方程式に基づいた数値計算により、波動場における没水平板周辺の詳細な流れの構造をシミュレートし、主に渦運動に着目して流れの基本的な性質を解明した。その結果、没水平板端部から発生した渦が移流し、次の周期で発生した渦と干渉する様子や形成される渦の規模などが明らかとなった。例えば、入射波条件によっては、形成される渦の規模が小さくても渦が移流して底面近傍まで達する場合があります。局所洗掘の原因となり得ることが示された。さらに、ダブルバリア型浮体の消波特性、動揺特性および構造物周辺の流れの様子を水理模型実験と数値計算の併用により詳細に検討した。なお、ダブルバリア型浮体は、マリーナや漁港での浮き桟橋や作業ヤードに高い防波機能を持たせ、多目的構造物として利用することを想定している。水理模型実験と数値計算から、ダブルバリア型浮体は、二重鉛直板による剥離せん断流の形成によってエネルギー損失効果が増大し、広範な周波数領域で高い消波機能を有することを示した。また、浮体幅波長比 $B/L \geq 0.2$ では二重鉛直板の効果により浮体の鉛直運動が著しく低減することが明らかとなった。この特性は、平常時に作業ヤードやビジター・バースとして利用する際に有利である。さらに、ポテンシャル理論に基づくダブルバリア型浮体の消波特性および鉛直動揺特性の簡易算定法を構築し、エネルギー損失モデルを付加することで定量的な推定精度を向上させた。

これを要するに、著者は波浪制御構造物近傍の乱流構造と局所流体力を数値シミュレーションと実験により明らかにしたもので、港湾工学・沿岸海洋工学の発展に寄与するところ大いなるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。