

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

沿岸域の強風による水塊輸送と越波機構の解明

Mechanism of Wave Overtopping and Mass Transport under the  
Influence of Strong Winds

申請者

稲垣 直人

Naoto INAGAKI

建設工学専攻 海岸工学研究

2023年2月

本論文は沿岸域の強風による水塊輸送と越波機構について、現地調査、数値シミュレーションモデル、水理実験の手法を用いて、その物理機構を解明し、その評価方法について検討したものである。現地調査は災害発生直後の時宜を得たものであり、数値モデルは従来の波動力学の数値モデルと乱流の計算モデルの双方を用いて高度であり、また水理実験は緻密に計画され、注意深く実行されていて信頼性の高い研究となっている。

審査に当たっては、2022年10月20日に審査委員予定者4名による予備審査会を実施し、専攻内縦覧に付してよい旨の判定を得た。2022年10月20日から11月17日に建設工学専攻における専攻内縦覧を行い、11月17日の専攻会議で博士論文受理の申請が認められた。受理申請を受けて、12月22日に開催された創造理工学研究科運営委員会にて論文が受理された。2023年1月12日に論文の公聴会を行った。公聴会では論文内容の発表の後に、質疑応答が行われた。申請者は、審査委員からの質疑に対して明確に回答を行い、研究内容に対する深い理解と関連分野に関する十分な学識・能力を有することが示された。なお、研究倫理については、博士後期課程学生として単位を取得している。また、論文の類似度判定を行い、問題はなかった。

本論文の第1章では、本論文の目的、課題の背景、従来の研究の不足している点、目的、研究の独自性について述べている。論文の導入としてわかりやすく記述されている。

第2章では、研究テーマの背景を説明している。横浜市・福浦海岸の被災状況から、沿岸域の強風が越波の総量を大きく増加させたことを指摘している。このような強風作用下の越波現象を捉えるにあたり、沿岸域の高波や越波を従来から用いられてきた波動理論のみから分析するのではなく、水塊の輸送として分析することを述べている。そのためにまず現地調査、観測データ、および気象一波浪モデルによる波浪追算の結果から、福浦海岸の被災機構の説明を行っている。現地調査では、海岸護岸の破壊や護岸背後の丘の斜面の洗掘跡や頂部の塩枯れについて、海水塊の一部が風によって飛来した可能性を指摘している。従来から用いられてきた数値モデルによる波浪追算の結果は、被害状況を過小評価していた。これらを踏まえて、瞬間的に生じる高波現象を水塊の質量輸送という運動学の視点から議論するという本論文の方針を述べている。この章では従来用いられてきた研究方法についても述べていて、その限界を踏まえて新たな研究設問を具体的に提示しているため、明確に本研究の必要性を理解できる。

第3章では、越波の研究について、風が越波にもたらす影響という視点から、これまでの歴史的な議論の変化について述べている。越波における風の影響は海岸構造物設計においては十分には考慮されてこなかった。1990年代には風洞水槽を用いて砕波、斜面遡上、飛沫といった様々な側面からの実験的研究がなされたが、風の影響を含めた現象の統一的な説明はなかった。2000年代には、風の影響は半経験的に導かれた補正項として設計式に組み

込まれたが、物理現象を正確に反映しているわけではなかった。このために、数値計算と水理実験の両面から議論を進める必要があると述べている。本章はこれまでの研究を踏まえて、新たな研究の必要性を説得力を持って述べており、高く評価することができる。

第4章では、数値シミュレーション用いて、水塊の質量輸送の視点から越波量を算定することを試みている。数値モデルには、有限体積法（FVM法）、VOF法を用い、既往の実験結果を再現しようとしている。このモデルでは風の増加によって越波流量が増加する現象を傾向としては再現しているものの、風による砕波現象の変化は再現性が低かったと述べている。結果として風速が高い領域で越波量は過小評価されていた。一方で、波動現象を不規則波に拡張し、福浦海岸の地形で実スケールの条件で算定すると計算結果は現地調査の結果をおおむね説明できることを示している。FVM-VOF法では、風速シェアなどの水と空気の界面での現象を取り込むことは原理的に困難であるとその限界を述べている。砕波など越波以前に生じる現象を流速分布の構造から議論することが重要であることを指摘し、数値シミュレーションモデルによる解析には限界があることを述べている。結果として、数値計算で再現できない現象を補うために、さらに詳細な水理実験が必要であると述べ、第5章の水理実験の重要性を強調している。本章では使用した数値モデルの手法について詳しく説明している。このシミュレーションモデルの説明は明確で解り易い。

第5章では、風洞水槽を用いた水理実験について記述している。流速計測にはPIV解析を用いている。砕波や部分重複波の形成などの越波より沖側で起こる現象も素過程として捉え、風の影響を無風時（風速 0 m/s）、中風速（6.84 m/s）、高風速（10.04 m/s）の場合について、越波流量を入射波の波形勾配で整理している。風速の増加に伴って、越波流量も著しく増加していた。また、特定の波形勾配の値で極値が現れることも解った。この極値は海岸構造物の設計に通常用いられる許容越波流量を大きく超えていて、風的作用によって越波量が増大することを述べている。また、具体的な風的作用を越波水塊に作用する直接的な影響と越波以前の砕波や部分重複波の形成に作用する間接的な影響に大別して整理している。直立壁に衝突した水塊は風による上方への移動と岸方向への輸送が同時に発生する。風の影響を直立壁上方の断面を通過する質量流量を算定することにより明らかにしている。間接的な風の影響は、砕波と部分重複波について、流速場のPIV解析を行っている。風速による運動の変化を流速分布の視点から考察し、越波流量が最大となるような波形勾配を持つ波は部分重複波の腹で大量の水塊を前方に運び、その一部が風で輸送されて越波することを指摘している。風によって砕波位置や砕波形態も変化し、高風速条件でより多くのエネルギーを消費することも発見している。これにより、特定の波形勾配では高風速条件での越波流量が中風速の場合よりも小さくなるという場合があることを説明すること

ができるとしている。風は越波水塊や伝播する波に対して複雑な変化をもたらすことが解り、時間平均的な物理量である越波流量に着目した議論では、複雑な物理現象を捉えられないと述べている。本研究のように対象の海岸構造物の断面を通過する質量流量に注目する方が、物理的背景の理解および越波現象の定量的な解明には有利であると、この研究の優れた点を強調している。本章に述べられた水理実験は長期間を要し、幾多の困難を解決しながら、精度の極めて高いデータを取得するために行われており、その成果は海岸工学を踏まえた信頼性の高いものとなっている。

第6章では、結論と今後の研究に向けた提言を行っている。強風作用下の越波機構を理解するには水塊の質量輸送として捉えることが適切で、その妥当性を数値モデル、水理実験の両面から示したとしている。

以上を要約すると、本論文はこれまで波動力学の範囲内でとらえられていた沿岸域の越波機構を、新たに強風による乱流下での水塊の質量輸送の観点から捉えなおしたもので、越波量の推定に革新的な貢献を行っている。したがって、本論文は社会環境工学、土木工学、海岸工学の分野に重要な貢献をするものであり、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2023年1月

#### 審査員

(主査) 早稲田大学教授 工学博士 (東京大学) 柴山 知也

(副査) 早稲田大学教授 工学博士 (名古屋大学) 榊原 豊

(副査) 早稲田大学教授 工学博士 (早稲田大学) 関根 正人

(副査) 早稲田大学教授 博士(工学)(横浜国立大学) Miguel Esteban

#### 学外審査委員

(副査) 東京都市大学准教授 博士 (工学) (早稲田大学) 三上 貴仁