

氏名	いわぶち ようこ 岩渕 洋子
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成19年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4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	臨海工業地帯における可燃物流出に着目した複合津波災害 メカニズム
指導教員	東北大学教授 今村 文彦
論文審査委員	主査 東北大学教授 今村 文彦 東北大学教授 真野 明 東北大学教授 風間 基樹 東北大学助教授 越村 俊一

論文内容要旨

現在の津波解析技術は向上しつつあり、津波発生時の初期水位分布が精度よく与えられれば、誤差10%以内で最大津波高さの予測が可能といわれている。このような解析結果は、防潮堤などの海岸防護施設の設計外力として利用されている。しかし、低頻度災害といわれる津波災害は、過去の資料も少なく、実際には想定以上の高さの津波が発生し、被害が拡大する場合も多い。特に、エネルギー集積地としての臨海工業地帯では、単なる津波の浸水による被害に加え、船舶などの漂流物や可燃物の漏洩等により複合・連鎖的に発生する被害が懸念されている。1964年に発生したアラスカ地震津波と新潟地震津波では、石油タンクから漏洩した油が大規模延焼火災を引き起こし、津波被災地は壊滅状態となった。津波と可燃物漏洩の複合被害の特徴は、津波が流出した油を移流・拡散させることが、延焼面積の拡大を助長することである。1964年新潟地震は地盤の液状化・津波・油火災という、複合・連鎖が被害を増幅させた重要な事例であり、複合津波災害についての貴重なデータが残されているにもかかわらず、これまで十分な分析が行われてこなかった。

臨海工業地帯では、利用形態を十分に把握し、その背後地域の安全確保などを十分に考慮した、戦略的な防災計画を進めることが極めて重要な課題であるといえる。しかしながら従来は、過去の事例や津波氾濫特性と港湾施設の状況から、被害を概略的かつ定性的に類推するにとどまっておられ、実際に油の流出・拡散を予測する推定手法は少なく、複合津波被害についてはその拡大過程やメカニズムが十分に明らかになっていないのが現状であり、軽減策を検討することが困難となっている。

本研究はこのような背景から、複合津波災害の中でも最も甚大な被害をもたらす可能性があるにも関わらず、十分な対策が講じられていない臨海工業地帯における可燃物(油)流出に焦点を絞り、被害評

価手法の確立に資するための解析手法を開発し、その利用について検討をおこなった。

まず、油流出の予測モデルの開発とその基礎検討をおこなった。さらに、既往の水理実験結果との比較からモデルの妥当性を検証した。最後に、1964年新潟地震津波の再現計算をおこなった上で、臨海工業地帯での油の拡がり過程を再現し被害の拡大過程を明らかにし、実地形に対するモデルの適用性について検討した。本研究は7章から構成されており、その主な内容を以下に示す。

第1章では、臨海工業地帯での複合津波被害に関する被災事例と既往研究について記し、課題を明らかにした。複数の被災事例から得られた共通課題として、油流出に着目し1964年以降の対策の変遷を整理し、残された課題を明らかにした。臨海工業地帯では、万一大量の油の流出があった場合、災害をいかに局所化して回収／処理していくかという防災体制の整備充実が検討されているが、その戦略的なシステムを構築する上で、津波の氾濫を考慮する必要性を示した。そのために被害推定において従来の浸水予測からさらに踏み込んで、臨海工業地帯の耐津波設計をおこなうためのツールとしての油流出予測モデルを整備していくことが求められている。そこでまず、既往モデルの適用性を明らかにした。津波による油の拡散を系統的に扱ったのは後藤(1985)が初めてであり、油層に対する連続の式、運動の方程式を導き、浅海域で油が水底に接触することも考慮している。また、粘性が原因の界面抵抗については、水と油の相対速度の2乗に比例するものを考えている。埜口ほか(1979)の実験と比べて妥当性を確認した後、宮古湾を対象として適用例を示し、この計算で得られた油の拡がり面積は、時間の経過と共に首藤の簡略式に漸近して行く(首藤, 1987)。このような先駆的な研究成果は存在するが、これまで過去の事例を分析して、実用的な予測モデルを検討した例はないことがわかった。

第2章では、1964年新潟地震津波の被害実態と被災シナリオについて時空間的に分析した。

航空写真と痕跡記録などから、漏洩した油の平面的な拡がりを把握した。石油コンビナート施設内のみならず、津波氾濫流にともなって河川・運河・低平地の市街地にも流入したことがわかった。他の漂流物被害の空間分布と重ね合わせることによって、油の流出災害が船舶や木材の被害と比較して被害範囲で格段に大きいことがわかった。さらに、油の被害分布を当時の都市計画図に重ねた結果、油被害が最も甚大であった地区(市街地)は、津波漂流物に対して地理的に脆弱であったことがわかった。次に、昭和石油での油流出に関する断片的な情報を時系列で整理し、津波の来襲状況と油流出拡散の時間的関連が明らかとなり、流出した油の拡散面積を津波氾濫流が拡大させたことが推定できた。

さらに、油の漏洩拡散を阻止する防油堤について、1964年新潟地震、1978年宮城県沖地震を例に被災パターン抽出によって、その性能と複合災害の被災シナリオ(油の流出開始の原因)と関連づけて

整理した。防油堤の脆弱性には、耐震性、耐津波性に分類できるが、後者が設計に考慮されていないことが問題点として明らかになった。

第3章では、陸上遡上域における油の輸送モデルの開発と基礎検討をおこなった。水と油の相互作用を考慮した非線形長波式に基づく2層流モデルを開発し、津波の陸上への遡上過程における油の輸送問題を数値実験により検討した。松本ら(1998)の土石流モデルでの密度比を変更し、これによって生じる油層先端部の不安定問題を適切な処理によって解決した。また、この先端処理において、油層の移流を長時間精度よく再現できる打ち切り水深として、連続の式と運動の式に対してそれぞれ $1.0 \times 10^{-3} \text{m}$, $1.0 \times 10^{-5} \text{m}$ という指標を得た。水と油の密度比を、臨海コンビナートの漏洩油の場合に相当する $\alpha=0.60$ から 0.90 に設定し、油層の移流状況を比較した。密度差をもつ流れでは重力の効果は $(\Delta\rho/\rho_0)g$ で現れるが、 0.90 以上の場合、油層の先端部が厚くなり水と油の界面は後端部で緩やかに波打つことがわかった。2層の密度差が小さく α が 1.0 に近い場合に、油層後端で不安定が生じる原因としては、数値解析上での数値粘性や分散性が影響している可能性があることがわかった。

第4章では、前節で開発した数値モデルの拡がり特性を、既往の水理実験結果を利用して検証をおこなった。既往の研究では、浮遊する油層に対して波を入射させた場合の水理実験を行なった例がない。利用できるのは、静水面上に放出された油の実験または、一様流れによる油の拡がり実験である。埜口(1979)の静水面上での実験データと結果の整理方法(埜口, 1991)を利用した。計算値を油層先端の移動の時間変化の関係で埜口(1991)と同様に整理し、重力粘性力領域においては、実験結果と良好に重なることことから、十分に再現できていることがわかった。津波遡上などの時間空間スケールでの再現性としては、埜口(1991)の図表を用いて、本モデルの妥当性が確認できた。

2層流モデルでは、界面抵抗係数 f の効果は上層と下層の相対速度の2乗に比例するために、静水面上での油の拡がりの場合には、界面抵抗係数 f を変化させてもほとんど結果が変わらなかったが、波動場のような水の流速が大きい場合では、油層の運搬距離に大きく影響する。このような結果をふまえて、波動場で界面抵抗係数 f の感度解析をおこなった。界面抵抗係数の設定は、 $f=0.020$ から 0.005 の間で変化させ、界面抵抗が小さくなる程より遠くまで油層が運搬され、油層は薄く引き伸ばされる傾向があることがわかった。これらの結果を界面抵抗係数 f 毎に、上層と下層の先端速度の速度比で整理し、界面抵抗係数 f が 0.001 と 0.030 の場合では速度比にして2倍以上の差があることが分かった。

第5章の2層流モデルの1964年新潟地震津波への適用では、まず、第2章で重要性が示された防油堤での越流を検討し、次に、1964年新潟地震津波の伝播を精度よく再現した上で、利用性を高めるため

に臨海工業地帯での油流出の検討をおこなった。まず防油堤を設置し漏洩油を滞油させた場合を初期条件とし津波を入射させる数値計算を実施した。斜面直上の防油堤を津波が越波し、貯油された油塊を津波が押し上げ、重油が防油堤外に溢れ出す過程を再現できた。防油堤近傍の急激に標高の変化する部分においても、数値計算の安定性が確保できた。1964年新潟地震津波の伝播・遡上計算をおこない、Aida(1969)のメカニズム解を用いて、滑り量などの断層パラメータを同定した。当時の阿賀野川の河道を復元して解析をおこなったところ、2箇所(松ヶ崎と船川)の潮位はAida(1969)の解析結果よりも一致度が高まった。潮位が高精度で一致したにもかかわらず、浸水域は実際よりも過小評価され、特に顕著であった液状化による地盤沈下および噴水の影響を考慮しなかったことが一因であることがわかった。津波浸水域を推定するためには、液状化による地盤沈下等の影響も考慮すべきであることを示唆する結果となった。次に単層の数値解析と断片的な資料とを融合することによって、臨海工業地帯内で流出した油の拡散面積を津波氾濫流が拡大させたという第2章での推定を裏付けた。1964年新潟地震津波を例に、水・油2層流モデルの適用実験をおこなった。臨海コンビナート施設内が液状化することを模擬した水膜を与える手法を提案し安定性を確保し、油層が津波に押し流される過程について再現できた。事例に適用した数値実験をおこなうことで、利用の面での課題を明らかにすることができた。

第6章では、油流出被害の推定手法確立に向けての展望についてまとめた。数値モデルは臨海工業地帯の耐津波性能の向上のための事前対策を検討するための手法として利用することを提案した。例えば、防油堤の耐津波設計や被災シナリオ作成のための利用を挙げた。津波の氾濫によって油が防油堤を越流することに対して、防油堤の構造や位置がどの程度機能するかを検討できる。一方、数値シミュレーションによる油の空間的拡がり予測域と土地利用状況とを重ね合わせることで、被害が現れる区域の土地利用毎に、有効な対策を考える材料として判読できると考え、事例を基に油の被災タイプを被害の深刻なものから軽微なものまで列挙した。深刻な被災形態から①油火災、②避難行動や救援活動の阻害、健康被害、③海上交通の阻害、④資産価値の減少、⑤環境汚染という被災レベルの代表例を示した。

第7章の結論では、本研究で得られた主要な結果を示し、今後の課題と展望について整理した。

以上、本研究では油流出の解析モデルを開発し、物性の変更、モデルの安定性などについて基礎検討をおこなった。さらにそのモデルの現地適用計算をおこなって利用性を高め、複合津波被害の軽減に資するための利用方法を提案した。

ただし、2層の密度差が小さく α が1.0に近い場合では、油層後端での不安定が生じている原因として、数値粘性や分散性が影響している可能性がある。長波理論に基づくモデルに数値解析手法として

Leap-frog 法を用いているため、数値粘性については移流項の一次風上差分、分散性については中央差分が影響していることが考えられるため、これらの影響を解明する必要がある。また、1964 年新潟地震津波の適用計算では、液状化による水膜を与えているが、油が地面に接地する場合の計算が可能となれば、遡上域での予測モデルの利用性が格段に高まるため、モデルを拡張しより実用性を高めていく必要がある。

数値モデルは既往の水理実験との比較によって、重力の効果が支配的である領域では妥当であることが示されたが、津波氾濫流やその中でも防油堤に突入する過程など、臨海工業地帯での課題に対応するためには課題を残している。防油堤内への突入過程へ適用するためには、波動場に適した f の値を、実験に基づいて正確に決定すること、混合過程のデータ取得が必要である。今後は、波動場での水理実験をおこない、数値モデルの修正が必要である。

今後の展望としては、上記をふまえた数値モデルの修正、波動場での拡がり特性の妥当性の検証をおこなうことによって、実用的でより高精度なモデルが期待できる。

論文審査結果の要旨

エネルギー集積地としての臨海工業地帯では、津波の浸水による被害に加え、可燃物（油）の漏洩等により複合的に発生する被害が懸念されている。従来は津波氾濫特性と港湾施設の状況から、被害を概略的に類推するにとどまっており、油の流出・拡散を予測する推定手法は少なく、軽減策の検討も困難となっている。本研究では、流出被害の評価手法の確立に資する解析手法を開発し、その利用について検討をおこなうことを目的としている。本研究は7章から構成されており、その内容を以下に示す。

第1章は序論である。

第2章では、1964年新潟地震津波の被害実態について時空間的に分析した。航空写真と痕跡記録から、津波氾濫流にともなって流出した油の平面的な拡がりを把握し、石油コンビナート施設内のみならず、河川・市街地にも流入したことがわかった。

第3章では、陸上遡上域における油の輸送モデルの開発と基礎検討をおこなった。水と油の相互作用を考慮した非線形長波式に基づく水・油2層流モデルを開発し、津波遡上過程における油の輸送問題を数値実験により検討した。

第4章では、前節で開発した数値モデルの拡がり特性の検証をおこなった。埜口の静水面での実験データと同様に整理し比較して、重力粘性力領域においては実験結果と良好に重なり、津波遡上の時間空間スケールで本モデルの妥当性が確認できた。

第5章の水・油2層流モデルの1964年新潟地震津波への適用では、津波伝播・遡上を精度よく再現した上で、利用性を高めるために臨海工業地帯での油流出の検討をおこなった。2層流モデルの適用実験をおこない、液状化による水膜を与える手法を提案し、安定性を確保した上で、油層が津波に押し流される過程を再現できた。

第6章では、油流出被害の推定手法確立に向けての展望についてまとめた。解析による油の拡がり予測域と土地利用状況を重ね合わせることで、被害区域の土地利用毎に有効な対策を考える材料として判読できると考え、事例を基に油の被災タイプを具体的に示した。

第7章は、結論である。

以上、本研究では油流出の解析モデルを開発し、モデルの安定性などについて基礎検討をおこなった。さらにそのモデルの現地適用計算をおこなって利用性を高め、複合津波被害の軽減に資するための利用方法を提案した。以上の成果は、今後の津波工学の発展へ大きく寄与できると期待できる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。