

氏名	たかはし ともゆき 高橋 智幸
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年2月12日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成5年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士前期課程 修了
学位論文題目	津波による土砂移動に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 首藤 伸夫 東北大学教授 澤本 正樹 東北大学教授 田中 仁 東北大学助教授 今村 文彦

論文内容要旨

津波来襲時には、その高い波高に注目が集まる。よって、従来の研究も波高を中心に行われてきており、波高に対する被害対策も進んでいる。しかし、津波による土砂移動に関しては、それによる被害の大きさに比して、十分な研究が為されておらず、被害対策もほとんど考えられてこなかった。また、最近、津波堆積物を用いた歴史津波の解明が試みられているが、津波による土砂移動モデルが存在しないため、定量的な評価にまでは至っていない。このように防災上、また学術的にも必要性の高い津波による土砂移動モデルを構築することが本研究の目的である。

具体的な研究の流れは次の通りである。まず、現地調査を行い現象を把握し、理論的にモデル化を行った。次にモデルに必要なパラメーターを水理実験を実施して決定し、最後に数値計算によりモデルの検証を行った。論文では、第1章において、津波による土砂移動に関する研究の必要性を述べ、研究目的を提示する。第2章において、国内外において実施した津波による土砂移動についての現地調査結果を報告する。第3章において、既往モデルの問題点を明らかにし、津波を対象とした新たなモデルの構築を行う。第4章において、水理実験を行い、モデルに必要なパラメーターを決定する。第5章において、数値計算を行い、モデルを検証する。第6章において、全体の結論を述べ、まとめとする。

以下、各章の概要を説明する。

第1章 序章

浅海域へ来襲した津波は大量の土砂を運搬し、災害を引き起こす。これまで報告されている例としては、洗掘による構造物倒壊や堆積による港湾機能障害などがある。また、発電所の取水口へ土砂が堆積した場合の危険性なども指摘されている。

さらに、陸上へ堆積した土砂が形成する津波堆積物は、歴史津波の解明に有効であることが最近認識され、盛んに研究が行われ始めている。津波防災上、既往津波に関する情報は不可欠であるが、歴史津波の資料は極めて少ない。古文書や言い伝えに頼らざるを得なく、それらの資料させ無い場合も多い。よって、地質学

的手法を用いた津波堆積物の解析は、歴史津波研究への大きな貢献が期待されている。しかし、発見された堆積物が津波によるものなのか、高潮などの他の外力によるものなのかの判定や堆積物からの定量的な津波評価については、依然問題を残している。これらの解決には、津波による土砂移動モデルが必要となる。

以上のように、津波による土砂移動に関する研究の必要性は極めて高い。しかし、従来の津波研究の多くは、波高に着目して行われてきた。これは、実際の津波から得られている資料のほとんどが、波高に関するものだったことに起因している。また、土砂移動についての定量的な資料の少なさや水理実験の難しさにも原因があった。

このような事情を踏まえ、津波による土砂移動に関する現地調査や水理実験を実施し、それらのデータから新たな土砂移動モデルを確立することが本研究の目的である。

第2章 津波による土砂移動に関する現地調査

津波に伴う土砂移動による被害の深刻さや津波堆積物の有用性が認識され始め、最近では土砂移動に関する調査も積極的に行われるようになってきた。本研究においても、国内外での津波に対して、現地調査を実施してきた。調査対象は以下の通りである。

国内では、1854年安政東海地震津波による静岡県南伊豆町入間、昭和8年三陸地震津波による岩手県田老町および太田名部での土砂移動に関する現地調査を実施した。国外では、インドネシアにおいては、1992年フローレス島地震津波によるバビ島、1994年ジャワ東部地震津波によるジャワ島南東部、1996年イリアン・ジャヤ地震津波によるピアク島での土砂移動を調査した。エーゲ海においては、トルコのDalamanとDidim、ギリシャのSantorini島で津波堆積物を調査した。特に、エーゲ海における調査では、歴史津波の解析を目的として、事前に津波は特定するのではなく、調査で得られた情報から、原因となった津波の推定を試みた。

第3章 津波による土砂移動のモデル化

初めに、河川流などを対象としてきた既往の移動床モデルを津波へ適用した。その結果、以下の様な問題点が明らかになった。

①既往の掃流砂量式は、通常の河川流などの小さい掃流力を想定して求められているため、津波のような大きな外力に適用できるかが不明である。②既往の浮遊砂濃度分布式は、平衡状態を仮定しているが、津波来襲時には非平衡状態となる。③既往の浮遊砂量式は、底面での掃流力から一意的に浮遊砂量が決定されていた。しかし、津波来襲時には、浮遊砂量は浮遊砂濃度と流量フラックスの積（浮遊砂フラックス）に支配されている。

以上の問題点を踏まえ、津波を対象とした新たな流砂モデルを提案した。本モデルでは、流砂を掃流層と浮遊層に分け、質量保存則から流砂の連続式を導いている。既往のモデルからの改善点は以下の通りである。

①掃流砂量式として、津波を想定した式を独自に求めることとした。②既往のモデルでは、巻き上げ砂量と沈降砂量は釣り合うとし、平衡状態を仮定していた。しかし、本モデルでは、掃流層・浮遊層間の交換砂量を導入し、非平衡状態への適用を可能にした。③既往のモデルでは、浮遊砂量を基準点濃度と平衡濃度分布から求めていたが、津波を対象とした場合、基準点濃度の決定は難しく、濃度分布は平衡にならない。よって、本モデルでは、両者を用いず、浮遊砂フラックスの空間変化と掃流層との交換砂を考慮した質量保存則より、浮遊砂量を決定している。④既往のモデルと比較し、本モデルでは、浮遊砂濃度分布を直接的に求めていない。これは、津波適用に際して浮遊砂濃度分布式の精度に問題があったため、本モデルでは意図的

に浮遊砂濃度分布を排除した結果である。しかし、本モデルにおいては、浮遊砂量が得られているため、既往モデルと同様の濃度分布を仮定すれば、濃度分布を求めることが可能である。既往モデルでの基準点濃度を浮遊砂量に置き換えたことに相当する。さらに、本モデルでの浮遊砂量は、既往モデルの基準点濃度よりも実地的であるため、より高精度の濃度分布が期待できる。

本モデルにおいて、掃流砂量と交換砂量以外のパラメーターは、初期値（津波来襲以前の状態）が与えられれば、時間発展方程式を解いて自ずから決定される。よって、掃流砂量と交換砂量を決定する方法が必要であるため、本研究では水理実験を実施し、運動方程式として求めた。

なお、本モデルの構成自体は、浅水理論のみを仮定しているため、津波に限定されていない。ただし、津波への適用に際し、掃流砂量と交換砂量という2つの未知パラメーターが津波を想定して求められている。したがって、それらのパラメーターを変更すれば、河川の洪水流などにも適用が可能である。

第4章 水理実験による掃流砂量式および交換砂量式の決定

水理実験を行うため、津波を対象とした実験装置を開発した。本実験装置の特徴は以下の通りである。

①津波を想定した大きな掃流力を発生させるため、大容量のヘッドタンクを高所に設置し、管路へ接続した。②管路内には、砂床区間を設け、実際の海砂を引きつめた。海砂を用いることにより、シールズ数（無次元掃流力）および摩擦速度・沈降速度比を実現と一致させることができた。③掃流砂用のトラップを管路終端に設置した。これにより、掃流状態で運搬される土砂と浮遊状態で運搬される土砂を分離して測定することが可能となった。④正確な流速を測定するため、砂床区間より上流側にレーザー流速計を設置した。

測定は、(a)流速の時系列、(b)管路内に堆積した土砂量、(c)管路終端のトラップに補足された土砂量および(d)管路から流れと一緒に流出した土砂量について行った。測定データの処理として、予備実験で求めた流速の対数分布則を(a)の流速に適用し、シールズ数を求めた。また、掃流砂は(b)と(c)の土砂量から、巻き上げ砂量は(d)の土砂量から求めた。

以上の実験より、掃流砂量式および掃流層・浮遊層間の交換砂量式を求めた。

第5章 数値計算によるモデルの検証

本モデルを検証するために数値計算を行った。計算対象は、1960年チリ地震津波来襲時の気仙沼湾をとした。同湾では、津波来襲前後の地形が測定されており、津波による海底変動が得られている。また、航空写真から、流速の空間分布も求められている。なお、気仙沼湾は細長い湾で、中央に狭窄部を有する地形となっている。実測された海底変動は以下の様な特徴を示していた。

①侵食領域と堆積領域が交互に分布：狭窄部が侵食され、侵食領域を挟んだ領域で堆積している。また、その堆積領域の外側で侵食されており、侵食と堆積が交互に繰り返すパターンを形成している。

②侵食卓越：侵食量は約260万 m^3 、堆積量は約70万 m^3 であり、侵食が卓越している。

既往のモデルによる計算では、狭窄部にのみに海底変動が見られ、湾口および湾奥ではほとんど変化が見られない結果となった。これは、浮遊砂を掃流砂と同様に局所フラックスとして取り扱っているため、掃流力の空間的变化のみが地形変化に影響を及ぼしているためである。気仙沼湾では、全体的に大きな掃流力が発生しているが、その空間的变化は、急縮と急拡が存在する狭窄部のみで大きく、その他の領域は直線的な水路であるため小さい。よって、狭窄部でのみ海底変動が生じた。

しかし、現実には、掃流力が空間的に変化しなくとも、乱れがあれば砂粒は巻き上げられるため、海底は

侵食を受ける。巻き上げられた砂粒は浮遊砂量を増加させ、運搬される。そして、乱れの小さい場所で沈降し、堆積に作用する。本研究で提案しているモデルでは、この物理過程を導入しているため、湾全体に渡り、侵食と堆積が見られる。特に、流れの変動が大きい狭窄部においては、侵食量と堆積量の分布や割合についてもよく再現している。

以上のように、数値計算の結果、提案しているモデルは、既往モデルに比べ、再現性が向上していることが確認された。ただし、変動量としては過小評価の傾向にある。これは、流速の再現自体が過小評価となっているためである。また、侵食量に対する堆積量の割合が実測値に比べて大きくなっている。これは、本モデルにおいては浮遊砂の沈降速度を一定としているが、現実には濁水および乱流中で変動していることが原因と考えられる。

第6章 結論

本研究は、現地調査、理論的モデル化、水理実験、数値計算より構成されており、以下のような結果を得た。

3種類の津波に関して現地調査を実施し、モデル化に必要な実現象の把握を行った。また、津波堆積物が、津波発生証拠だけでなく、来襲状況に関する情報をも提供でき得ることを示した。

次に、理論的に、津波による土砂移動モデルの構築を行った。その際、既往モデルの津波適用上の問題点を明らかにし、その改善を図った。

モデル化には、津波を対象とした掃流砂量式および交換砂量式が必要になるため、水理実験を実施した。実験において、津波を想定した大外力を発生でき、掃流砂と浮遊砂を分離して解析できる装置を開発した。

最後に、提案モデルの検証を行うため、1960年チリ地震津波来襲時の気仙沼湾について数値計算を実施した。実測値との比較から、提案モデルの再現性が既往モデルに比べて向上していることを確認した。

審査結果の要旨

津波がもたらす大量土砂移動の結果として、地形変化、構造物倒壊、田畑荒廃などが数多く報告されているが、その実態は明らかではない。また、地質考古学の立場から津波堆積物によって歴史津波を検証するようになってきたが、その津波の規模などを推定する方法は存在しない。本論文は、野外調査、理論、水理及び数値実験の各面から、土砂移動の実態を明らかにするために行った研究をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章は野外調査結果である。トルコ、ギリシャの3地点において発掘を行い、歴史津波の存在を確認している。

インドネシアの3地点については、それぞれ3つの異なる津波に対し、津波発生直後に堆積物の調査を行い、その解析から津波来襲状況に関する情報が得られることを明らかにした。これは今後の歴史津波解析手法に大きな影響を与える成果である。

国内では、4地点での歴史津波に関連する調査を実施している。特に、静岡県南伊豆町については、初めて堆積土砂総量を確定する事が出来た。これは、極めて有用な知見である。

第3章は津波による土砂移動を求めるための方程式の導入である。浅海での海底構成土砂は粒度が揃い、実用上は同一粒径として良いにも関わらず、津波で発生する大掃流力の下では、掃流及び浮遊の両形態が共存した土砂移動が生ずる。したがって、掃流層と浮遊層とに分割し、それぞれに対する連続の式、運動の式を導いた。この二つの方程式群は両層間の交換砂量を通じて結合されている。

第4章では、大掃流力の非定常流を発生できる装置を作成し、水理実験を行った。大掃流力に対応する流砂量公式、及び浮遊層・掃流層間の交換砂量公式を確定した。これによって、前章で導入した方程式が完結し、津波時の砂移動を適切に解けることとなった。

第5章は開発した方程式の実例への適用である。1960年チリ津波によって生じた宮城県気仙沼湾の海底変形の追算を行い、実測結果を説明する事が出来た。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、津波時の土砂移動の実態を明らかにするとともに、これを再現或いは推定するための方程式を開発したもので、津波工学及び土砂水理学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。