

氏名	五十嵐善哉
博士の専攻分野の名称	博士（学術）
学位記号番号	博理工甲第 1162 号
学位授与年月日	令和2年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	レベル2津波に対する多重防御構造物の減災機構の解明と定量的評価
論文審査委員	委員長 教授 田中 規夫 委員 教授 藤野 毅 委員 准教授 八木澤順治 委員 教授 川本 健

論文の内容の要旨

東北地方太平洋沖地震津波は従来の想定を大幅に上回る規模であった。その後、最大クラスのレベル2津波に対しては多重防御による減災が推進されることとなった。これを受けて、多重防御に関する研究が始められ、多重防御構造の整備計画がされている地域や、すでにほとんど完成している地域もある。ただし、多重防御構造を津波が越流する際に生じる流況が複雑であり、減災効果の定量的な評価が難しい。また、樹林帯や防潮堤、第2堤防、人工堀や運河の活用など、様々な組み合わせが考えられるため、津波減災に有効な構造が確立されていない。そこで本論では、第一に、多重防御構造を越流する際に生じる流況と津波減災効果の関係を解明するため、水理模型実験と理論式の構築を行った。多重防御構造はその組み合わせが無数に考えられるが、水理実験でそれらすべての条件について検討することは難しい。多数の構造や津波条件に対して比較するため、計算負荷が小さい数値解析手法を用いる必要がある。ただし、越流時の流況が複雑であるため、定量的な比較のためには、高精度な数値解析手法が求められる。以上より本論では、第二に、計算負荷が小さく、かつ高精度な数値解析手法を開発し、その精度等を検証した。

水理模型実験では、4つの異なる多重防御構造について検討した。二線堤構造は、減勢工のように跳水を発生させてエネルギーを減衰させる効果と、第2堤防背後の浸水を遅らせる遅延効果が期待される。堤防と杭群の構造は、第2堤防が洗堀された後も流体力の減少効果を維持させることを狙った構造である。樹林帯と堤防の構造は、海側樹林帯による津波の越流量減少効果が期待される。河川沿いの樹林帯と堀は、河川遡上津波に対する構造背後では流体力の減少が期待されるが、樹林帯等の反射により対岸側に悪影響を及ぼす危険性もある。以上からこれら4つの構造に注目した。

二線堤構造および堤防と杭群の構造では、跳水が発生する流況や、第2堤防または杭群により流れが斜方投射されて背後の底面をたたく流況では同様にエネルギー減衰効果が高い。堤防と杭群の構造では、杭群の内部の流れが通過するため、杭が沈水状態のときは杭上部と内部の流れの流速差から杭背後で渦が生成され、エネルギーが減衰された。一方で、疎で流れ方向に1列の杭群が抽水状態のとき、その背後で定在波が発生し、局所的にエネルギー減衰効果が低くなった。二線堤構造では堤防間で跳水が発生する流況が理想流況である。これは、エネルギー減衰効果が高く、また、堤防裏法尻の水位を上げることで洗堀抑制効果も期待できるためである。理論式ではこの理想流況の発生を判定する。第1堤防天端から第2堤防天端までの6断面におけ

る水深と流速を、連続式と運動方程式により解き、最終的に第2堤防天端を射流状態で内陸側方向の流速の実数解が得られるか否かで判定した。特徴として、堤防法尻では未知数の外力を解くことで非静水圧を考慮し、第2堤防の表法尻の死水域を考慮している。この結果、理論式は実験と比較して整合性が高かった。

特に堤防越流は氾濫域や背後の家屋被害に大きく影響するため精度が求められる。一方で、津波のような非定常な流れを安定して解析することも求められる。堤防越流では、天端や法尻付近で非静水圧が生じることが知られているものの、非静水圧を無視しない解析では非物理的な振動が生じやすく、安定性の面で課題が残る。そのため、本解析では水深積分型の運動方程式について、非物理的な振動が生じる大きな要因である時間微分の項を除いて、その他の非静水圧項を無視せずに解析を行った。その結果、計算負荷の小さい陽解法で単精度差分であっても、定常流に対して堤防越流時の堤防付近の水位や越流量が精度よく解析された。また、非定常流についても水理実験との比較を行い、水位の立ち上がりも含めて高精度に、安定した解析ができることを示した。

北海道白糠町で整備されている、海側から樹林帯、堀、堤防という多重防御構造は、津波越流時に特に堀の内部で複雑な流況が発生する。このような構造に対しても、本論で改良された解析手法では非物理的な振動が生じることなく、滑らかな水位変化が計算できた。この解析手法により、異なる多重防御構造の定量的な評価が可能であることを示した。

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、令和2年2月7日に論文発表会を開催し、論文内容の発表に続いて質疑と論文内容の審査を行なった。以下に審査結果を要約する。

2011年の東北地方太平洋沖地震津波による被害をうけて、津波対策には2つのレベル（レベル1：防災レベル、レベル2：減災レベル）が設定された。レベル2津波に対する対策の1つとして多重防御による減災が推進されることとなった。これを受けて、多重防御に関する研究が始められた。多重防御構造においては、樹林帯や防潮堤、第2堤防、人工堀や運河の活用など、様々な組み合わせが考えられるため、津波減災に有効な構造が確立されていない。そこで申請者は、多重防御構造を越流する際に生じる流況と津波減災効果の関係を解明するため、水理模型実験と理論式の構築を行った。次に、様々な多重防御構造の効果が津波条件に対してどのように変化するかを比較解析するため、精度が高くかつ計算負荷が小さい数値解析手法の開発を行い、その精度等を検証している。

水理模型実験では、4つの異なる多重防御構造について検討している。二線堤構造では、減勢工のように跳水を発生させてエネルギーを減衰させる効果と、第2堤防背後の浸水を遅らせる遅延効果を期待してその効果を明らかにしている。堤防と杭群の構造は、第2堤防が洗掘された後も流体力の減少効果を維持させることを狙った構造である。樹林帯と堤防の構造は、堤防による反射効果だけではなく既存の海側樹林帯の破壊を低減もしくは遅延させることによる津波の減勢効果を期待した構造である。河川沿いの樹林帯と堀は、河川遡上津波が氾濫した場合に構造背後での流体力減少を期待したものである。

第2章では、二線堤、堤防と杭群、樹林帯と堤防、河川遡上津波に対する樹林帯と減勢堀の減災メカニズムについてまとめている。メカニズムを考慮して流況分類を行っている。二線堤構造では堤防間で跳水が発生する流況が理想流況、すなわち、エネルギー減衰効果が高く、また、堤防裏法尻の水位を上げることで洗掘抑制効果も期待できるとしている。杭が沈水状態のときは杭上部と内部の流れの流速差から杭背後で渦が生成され、エネルギーが減衰されること、疎で流れ方向に1列の杭群が抽水状態のとき、その背後で定在波が発生し、局所的にエネルギー減衰効果が低くなることなどを明らかにしている。樹林帯と堤防の構造については、わずか2列の樹林帯でも、樹林帯と堤防の複合的な反射によって堤防越流量が1-2割程度減少することを示した。また、堤防高に対して汀線付近での波高が1より小さい場合は、樹木転倒が生じても同様の効果が確認された。ただし、堤防の海側法面上に薄い樹林帯が存在する場合、流れの方向をわずかに鉛直上向きに変化させるため、越流量がわずかに増加させる場合がある。

河川沿いの樹林帯と堀は、その背後では津波のエネルギーや流体力を減少させるものの、樹林帯が密で、河川に対して平行ではなく角度を有する場合、対岸側の水深が15-35%増加する場合がある。堀は跳水により水位を上昇させ、対岸側までその影響を及ぼすという欠点と、エネルギーを減衰させる利点を併せ持つ。

第3章では二線堤においてエネルギー減勢効果が高い理想流況の発生を判定する理論解析法を構築している。第1堤防天端から第2堤防天端までの6区間における水深と流速を、連続式と運動方程式により解き、最終的に第2堤防天端を射流状態で内陸側方向の流速の実数解が得られるか否かで判定した。特徴として、堤防法尻では未知数の外力を解くことで非静水圧を考慮し、第2堤防の表法尻の死水域を考慮している。この結果、実験と整合性の高い理論式を構築している。

堤防越流は氾濫域や背後の家屋被害に大きく影響するため精度が求められる。一方で、津波のような非定常な流れを安定して解析することも求められる。堤防越流では、天端や法尻付近で非静水圧が生じることが知られているものの、非静水圧を無視しない解析では非物理的な振動が生じやすく、安定性の面で課題が残

る。そのため、第4章では水深積分型の運動方程式について、非物理的な振動が生じる大きな要因である時間微分の項を除いて、その他の非静水圧項を無視せずに解析を行った。その結果、計算負荷の小さい陽解法で単精度差分であっても、定常流に対して堤防越流時の堤防付近の水位や越流量が精度よく解析された。また、非定常流についても水理実験との比較を行い、水位の立ち上がりも含めて、高精度で安定した解析ができることを示している。また、北海道白糠町で整備されている、海側から樹林帯、堀、堤防という多重防御構造は、津波越流時に特に堀の内部で複雑な流況が発生する。このような構造に対しても、本論で改良された解析手法では非物理的な振動が生じることなく、滑らかな水位変化が計算できた。この解析手法により、異なる多重防御構造の定量的な評価が可能であることを示した。

以上のように、水理実験、理論解析、数値解析をもとに、津波に対する多重防御構造物の効果を流れ現象としてとらえ解明していること、高度な数値解析手法により一般的知見を得ていることより、津波減災工学分野に重要な知見を提供している。このことから、当学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位に相応しい内容であると判断した。

なお、本論文の内容は、国際学術雑誌 Ocean Engineering に掲載済み、国際学術シンポジウム APD-IAHR（インドネシア）で発表し優秀論文賞を受賞、IAHR（パナマ）で発表済みである。