

氏名	柳澤 英明
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成20年3月25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	2004年インド洋大津波に対するマングローブ林のフラジリティーと津波減災効果
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 田中 仁 教授 宮城 豊彦 東北大学准教授 越村 俊一 (東北学院大学)

論文内容要旨

アジア地域では、これまで地震や津波、洪水など自然災害によって多大なる被害を被ってきた。近年、世界で発生した自然災害の6割弱、死者・行方不明者数の9割強がアジア地域に集中している。アジア地域は世界でも最も自然災害に脆弱な地域であるといえよう。自然災害の中でも、特に津波による災害は、低頻度ではあるが一度発生すると多くの人的・物的被害を発生させる。例えば、2004年12月26日にインドネシア・スマトラ島沖を震源域とするM9.0の地震によって発生した津波は、インド洋沿岸を中心に22万人以上の人命を奪う未曾有の災害を引き起こした。被災地の多くでは、津波対策がほとんど講じられておらず、防波堤・防潮堤などの防災施設の整備はほとんどされていなかった。特に、発展途上国においては、経済的な観点から有効な津波防災施設を整備していくことが難しい現状がある。このような中で近年、珊瑚や海岸林など、自然が本来持つ防災機能を減災に生かしていくことが、経済的かつ環境調和的な防災対策として、東南・南アジアの津波被災地で注目されるようになってきた。海岸林の減災効果に関しては、わが国では古くからその効果が着目されており、最近では、数値シミュレーションを通じた検討も行われ、津波対策としての有効性が示されている。東南・南アジアなどの熱帯・亜熱帯地域では、海岸林の中でも、特に、マングローブ林が沿岸域に独特の生態系を形成しており、防災機能とともに、環境的価値の高い森林生態系として、その高い効用に大きな期待が寄せられている。

一方で、海岸林による津波減災効果とは相反し、大きな津波が襲来した場合、海岸林は大規模に破壊され、その減災効果はおろか、漂流物化する危険性も指摘されている。海岸林を津波防災に利用していくためには、海岸林自身の破壊状況も考慮していく必要がある。津波による海岸林の倒木に関しては、過去の津波による海岸林の被害例をまとめ、樹木が倒木するときの限界を検討した研究や、津日本の海岸や河川域を対象に樹木の引き倒し試験等の研究が実施されている。しかしながら樹木の倒木限界は、同様の樹種、樹径のものであっても個々の特性や地盤の状況によってばらつきをもっており、決定論的にその限界を決めることは難しい。それゆえ、海岸林の倒木に対しては、不確実性を考慮したフラジリティーを検討していくことが望まれている。

そこで、本研究では、詳細な現地調査、津波襲来前後の衛星画像解析、そして数値シミュレーションを実施し、

津波によるマングローブ林の脆弱性と津波減災効果を検討した。各章における内容は以下の通りである。

第1章では、海岸林による津波減災効果に関する既往の研究の成果を整理し、課題を明らかとした。その結果、既往研究では水槽実験や数値シミュレーションを通じて海岸林の津波減衰効果が評価されているものの、津波による樹木の破壊が考慮されておらず、津波減衰効果を過大に評価してしまっていることが分かった。一方、海岸林の効果の限界に関する既往研究では、倒伏試験や載荷試験、文献調査などから倒木限界の検討が行われているものの、同様の樹種、樹径のものでも個々の特性によって強度は異なっており、確定論的にそれを決めることは難しいことが分かった。これより、海岸林の倒木に対しては、個々の樹木強度特性による不確実性を考慮した脆弱性を検討していく必要があることがわかった。

第2章では、マングローブ林の分布と多様な機能と利用形態に関して文献調査を行うとともに、衛星画像を用いてインドネシア・スマトラ島北部地域におけるマングローブ林の伐採状況を調査した。その結果、1960年代からマングローブ林の人的伐採が世界的に広がっており、2004年インド洋大津波が襲来した地域では、Banda Aceh および Silga においては、過去、マングローブ林に大規模な人的伐採が生じていたことを明らかにした。また、マングローブの形状や成長率などについての既往研究を整理し、マングローブ林の胸高直径に対し、樹高、植生密度、そして樹齢において相関があることを示した。この結果を利用することにより、樹齢に応じたマングローブ林の状態を想定できるようになった。

第3章では、この2004年インド洋大津波による各国の人的・物的被害の状況や観測記録をまとめ、その被害実態を整理した。ここで整理した結果は、第4章の現地調査における調査地域の選定や津波規模の把握、第5章における数値シミュレーションの妥当性の検証、また第7章における人的被害に関する脆弱性関数の作成等に利用されている。

第4章では、2004年インド洋大津波によって被害を受けたタイ・Pakarang 岬、Namkem および、インドネシア・Banda Aceh で現地調査を実施し、津波によるマングローブ林の倒木状況が明らかにした。タイ Pakarang 岬の調査では、*Rhizophora* 属および *Bruguiera* 属を対象に被害調査を実施し、*Rhizophora* 属においては、津波に対するマングローブの生存率は樹径のサイズに大きく関連していることを明らかとした。一方で、*Bruguiera* 属に関しては、大きさに関係せず、そのほとんどが倒木しており、津波に対して脆弱であることがわかった。一方、タイ Namkem での調査では、幅1 - 2 m 程度の小水路に津波が集中し、マングローブ林内に鋸上の破壊が生じていたことを明らかとした。また、インドネシア・Banda Aceh における調査では、津波高が10 m を超える地域で、マングローブ林はすべて破壊されてしまっている状況を明らかとした。以上より、マングローブ林の破壊条件として、樹種（倒木パターン）、樹径、津波の挙動（外力）が影響していることがわかった。

第5章では、非線形長波理論を用いて、2004年インド洋大津波の再現計算をおこない、タイ Pakarang 岬、Namkem、インドネシア Banda Aceh に襲来した津波の流動状況を検討した。まず妥当性の検証として、それぞれの地域における津波痕跡高と数値解析の結果を比較し、数値解析結果が観測記録を良好に再現できることを示した。そこで、

数値解析から津波の挙動を検討した結果、タイ Pakarang 岬では、地盤の低いマングローブ域に津波が集中し、さらに津波が河川を遡上し、マングローブ林内へ浸入していく状況を明らかにすることができた。また、タイ Namkem でも、河川を遡上した津波がマングローブ林や市街地に流入し、約 2 - 4 m/s 以上の流速が発生していたことが分かった。インドネシア・Banda Aceh では、津波波源が西にあるためバンダアチェの西の海岸で津波高が大きく、また海底地形による屈折によって、中央で少し小さくなり、東にいくと増加するという分布があることが分かった。

第 6 章では、現地調査および衛星画像によって観測された破壊状況と数値シミュレーションの結果を比較することでマングローブ林の脆弱関数を推定した。なお、脆弱関数は、樹林帯の植生密度が粗いケース (Pakarang 岬および Banda Aceh) と樹林帯の植生密度が濃いケース (Namkem) に分けて検討した。まず前者では、樹木一本一本に生じた曲げ応力とマングローブの破壊率と比較し、津波外力と被害の関連性を明らかにした。さらに対数正規分布の累積関数を適用させ、曲げ応力に対する脆弱関数を作成した (図 1)。これによると、胸高直径が 15 cm の場合、津波浸水深が 4.5 - 6.5 m ($Fr=0.6-1.2$) で破壊率がほぼ 100 % となり、マングローブ林は津波対策として、完全に無力となりうるということがわかった。一方、樹林帯の植生密度が濃いケース (Namkem) では、衛星画像よりマングローブ林の生存面積を抽出し、数値シミュレーションによる水流圧力と比較することで脆弱関数を構築した。これらによれば、Namkem のような樹径の細いマングローブ林は、浸水深が約 1.3 - 2.7 m ($Fr=0.6-1.2$) の津波によって大部分が倒木してしまうことが明らかとなった。このことは、Pakarang 岬や Banda Aceh のような植生密度が粗くてもある程度の樹径を確保した“倒木しない”樹林帯を形成していくことが望ましいとうことを示している。

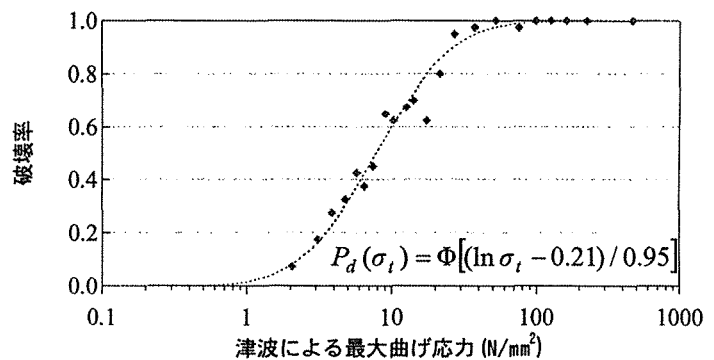


図 1 脆弱関数 (樹林帯の植生密度が粗いケース : Banda Aceh と Pakarang 岬)

第 7 章では、マングローブ林の津波減衰効果を定量的に検討するため、第六章で提案した脆弱関数 (樹林帯の植生密度が粗いケース) を用いて、津波によるマングローブ林の破壊率を考慮した数値計算手法を提案した。まず、第 2 章で提案したマングローブの成長曲線を用いて、樹齢 10 年生、20 年生、40 年生の森を想定し (幅 100 - 400)、一様勾配上でマングローブ林による津波減衰効果を検討した。その結果、マングローブ林の破壊は入射浸水深が 4.0 - 5.0 m から大きくなり始め、6.0m では林帯幅、樹齢を問わず、ほぼすべてのマングローブ林が破壊され、津波減衰効果はほとんど得られないことが分かった。一方、津波浸水深が 3.0m 以下の場合には、どの樹齢においてもマングローブ林に破壊はほとんどなく、特に樹齢 10 年生の森は植生密度が密なため、高

い津波減衰効果を発揮できることが示された。

本研究では、さらにインドネシア Banda Aceh に樹齢 40 年生の mangrove 林を想定し、2004 年インド洋大津波に対する津波減災効果を検討した。ここでは、現在 (2004 年) と推定された過去の mangrove 林の分布状況を与えて、被害の発生状況を比較している。その結果、mangrove 林は人的被害を約 44%、人数にして 30000 人以上の人的被害を低減可能であることが示された (図 2)。今後、インドネシア・Banda Aceh において mangrove 林を植林していくことで、津波災害を軽減できることが定量的に示された。

第 8 章では、本研究で得られた主要な結果を示し、今後の課題について整理した。本研究における課題としては、脆弱性関数の適用性を検討していくことが挙げられる。本研究で提案した脆弱性関数は、インドネシア Banda Aceh、タイ Pakarang 岬および Namkem における破壊状況に基づいて作成されたものである。そのため、その他の地域に適用する場合、脆弱性関数に含まれる不確実性 (樹木特性、漂流物など) が変化してくる可能性があり、今後、様々な地域における適用性を検討していく必要がある。

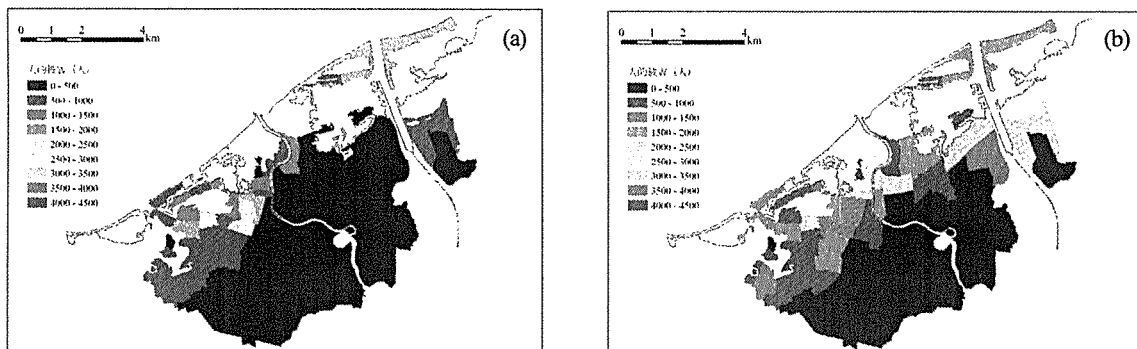


図 2 (a) 過去の mangrove 林と (b) 現在 (2004 年時点) の mangrove 林を想定した場合の

2004 年インド洋大津波による人的被害

論文審査結果の要旨

2004年インド洋大津波において、海岸林の津波減災効果が確認され、その効果に注目が集まっている。しかし、実際の津波来襲後の被災状況や樹木の実態に関するデータは限られており、そのモデル化については課題が多く残されている。そこで、本研究では、現地調査結果を踏まえた樹木の抵抗モデル、不確実性を考慮したフラジリティーの提案、さらには、現場での減災効果の評価を実施することを目的とする。その内容を以下に示す。

第1章は緒論である。

第2章では、マングローブ林の分布と多様な機能・利用形態・森林伐採の状況を整理し、マングローブ林を利用・保護していくことの重要性を明らかにした。また、マングローブの形状や成長率などについての既往研究を整理し、想定可能なマングローブ林の条件を整理した。

第3章では、この2004年インド洋大津波による各国の人的・物的被害の状況や観測記録をまとめた。ここで整理した結果は、第4章の現地調査における調査地域の選定や津波規模の把握、第5章における数値シミュレーションの妥当性の検証、また第7章における人的被害に関するフラジリティー関数の作成等に利用した。

第4章では、2004年インド洋大津波によるマングローブの被害調査を実施し、その被害実態を明らかにした。

第5章では、2004年インド洋大津波の再現計算を行ない、各対象地域に襲来した2004年インド洋大津波がマングローブ林内を遡上過程を解析した。

第6章では、現地調査および、衛生画像解析より得られたマングローブ林の破壊状況と数値シミュレーションから評価した津波の流体力を比較し、津波外力に対するマングローブ林のフラジリティーを検討した。

第7章では、提案されたフラジリティー関数を利用して、津波によるマングローブ林の破壊率を考慮した津波減衰効果を評価する手法を提案している。インドネシア Banda Aceh に数値モデルを適用し、2004年インド洋大津波に対するマングローブ林の津波災効果を評価した。

第8章は、結論である。

以上、2004年インド洋大津波による被害調査、衛生画像解析を実施し、さらに津波の数値シミュレーションから得られた津波の外力と比較することで、マングローブ林のフラジリティー関数を構築した。さらに、現場で津波減災効果を評価する手法を提案した。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。