

氏 名	TALPE LIYANAGE CHANAKA VINODH
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1208号
学位授与年月日	令和3年3月25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	EXPERIMENTAL STUDY OF SOLITARY WAVE RUNUP REDUCTION BY COASTAL LAGOON, CORAL REEF AND FOREST (潟湖、サンゴ礁、海岸林による孤立波の遡上高減少量に関する実験的研究)
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

The 2004 Indian Ocean Tsunami and the 2011 Great East Japan Tsunami emphasise the importance of Ecosystem-based Disaster Risk Reduction (Eco-DRR) to minimise the incredibly challenging impact of future tsunamis, to protect the living community, environment, and infrastructure.

A statistical and geospatial analysis was conducted for coastal lagoons in Sri Lanka that affected by tsunami using collected field surveying data, statistical data, DEM data and land use data. The spatial variability of the settlement, forest and lagoon mouth was discussed. Influence by existing coast protective structures, drainage structures and the connection to the sea was investigated. The physical dimensions such as beach slope, dune height, barrier length, lagoon length in cross-shore and longshore direction and the area were investigated and how such parameters affect the damage ratio was illustrated.

Based on the statistical and geospatial analysis, it was found that the building located close to the lagoon mouth and on barrier land were found to be extremely vulnerable to tsunami wave. The presence of a narrow channel connecting to a lagoon observed high tsunami damage ratio. The lagoons with the closed mouth also exhibited more severe damage in the east part of Sri Lanka. The location of the forest does not make much difference in tsunami damage, but the dense mangrove could reduce the damage, whereas patchy, scattered and swamps did not reduce the tsunami damage. Existence of coast protective structures and the drainage structures did not exhibit an effect on impact to tsunami damage. The offshore bathymetry (i.e. fringing reef or reef lagoon) did not influence on tsunami damage ratio. When the length of barrier length in opening direction was less than 650 m, cause extensive damage, and the effectiveness of lagoon could not be observed. When the summation of lagoon length and barrier length reached beyond 750 m the damage in the upstream of the lagoon was minimised which implies that the distance to the coast is a major governing

factor in evaluating damage ratio. The beach slope, barrier height and area of a lagoon is found to be less influence on the damage ratio.

Limitations of the statistical and geospatial analysis were presented. To investigate in detail form of real tsunami incident waves and to overcome the limitations of statistical and geospatial analysis, the laboratory experiments were conducted at Saitama University to understand how a tsunami-like solitary wave vertical runup can be reduced in one horizontal dimension against the effects of the plane beach, dune height, depth, and length of the lagoon in the cross-shore direction and also with and without forest. The rigid emergent circular cylinders in a staggered arrangement were used as the forest model for all wave conditions. The maximum runup of a compound slope was measured to investigate the applicability of the derived empirical equation for runup on a plane beach. Besides, the solitary wave runup on coral reef system has been tested. The bathymetry of reef profile was tested as reef-flat, reef-lagoon and reef-crest. The rectangular strips at regular intervals representing the roughness of a more simplified coral reef system, along the cross-shore direction were tested for the case of reef-flat with roughness.

The solitary wave runup on a plane beach having the slopes of  $1/4$ ,  $1/7$  and  $1/10$  were tested. The compound slopes consist of  $1/7$  and  $1/10$  as the foreshore slopes and  $1/4$  as the onshore slopes were tested to testify the applicability of the empirical equation derived for solitary wave runup on a plane beach. The forest model on a sloping beach having slopes of  $1/4$  and  $1/7$  were investigated. The maximum runup of a lagoon by changing the foreshore slopes as  $1/1$ ,  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/7$  and  $1/10$ , dune height and lagoon inside depths, was measured. Also, the forest model was placed on a sand dune by changing the position (front, middle and back of sand dune) and investigated. A coral reef platform consists of the fore-reef slope of  $1/7$  and landward slope of  $1/4$  were tested by changing the bathymetry profiles to represent reef crest, reef lagoon and reef flat with and without roughness.

The plunging breaking, surging breaking and nonbreaking type of waves were observed on the beach slope and the fore reef slope. The undulations with no breaking and leading wave breaking and turbulent bores were observed inside lagoon with the change of wave transmission height to lagoon water depth ratios. The multiple wave reflection and backwater rise could be observed with the introduction of forest model. The progressive and growing, progressive and dissipative, and resonant waves could be observed in coral reef platforms. The turbulent bores and spilling breaking on the reef flat, surging breaking (bore type) and nonbreaking waves on the landward slope were observed.

The resultant wave transmission height and maximum runup were measured varying incident wave characteristics as well as the dimensional physical properties of each model. The wave height to depth ratio from 0.1 to 0.4 was used.

The breaking criterion was discussed with the previous researchers work. The dimensional analysis was employed to pick up essential parameters for comparing the maximum runup effect. The present laboratory data and the previous researchers' work were also employed in the study. Hence the results of maximum runup were used in conjunction with previous research works to derive empirical formulas for solitary

wave runup on a plane beach, forest on a sloping beach, sand dune coastal lagoon, reef flat and reef lagoon, individually.

The maximum runup found to be most sensitive to the bathymetry profile change and the location of wave breaking and then to the wave formation inside of the sand dune coastal lagoon or reef platform. At the near-breaking condition, the highest runup was observed. The runup effect corresponded to change of physical dimension was discussed in detail. In the case of the coral reef system, the length of reef-flat was found to be a dominant factor when it equals the one-fourth of the incident wavelength of a solitary gives the highest runup. The incident wave height to reef water depth ratio also found to be a determining parameter for estimating runup as it describes the breaking limit. Runup behind a reef lagoon was found to be comparatively higher than a reef flat.

However, with the introduction of the coastal forest into the coastal lagoon system, the runup was effectively reduced. Similarly, for coral reef platform, the runup reduction was observed with the intermediate coral reef roughness ('k' type), but not so significant as a forest model. Dense coral roughness ('d' type) did not exhibit noticeable runup reduction and found it acts like the reef flat without roughness (i.e., smooth surface) and reef crest. The effect of runup reduction by the roughness of coral reef roughness was found to be less significant than the forest of finite width.

Thus, a coastal lagoon having larger dune and more considerable length in the cross-shore distance with a forest width helps to increase more resilience against tsunami attack even when energy reduction at the beach slope is not sufficient. A coral reef platform with wide width, shallow reef water depth and intermediate roughness can be considered as useful in tsunami energy dissipation but found to be not so effective compared to the sand dune coastal lagoon with coastal forest.

The limitations of the laboratory experiments were presented, and the future direction of the research was explained. However, the most critical parameters which can be used to evaluate tsunami damage is highlighted in this study to design coastal landscapes based on Eco-DRR concept.

## 論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、令和3年2月5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。

2004年インド洋大津波や2011年東北地方太平洋沖地震津波の被害を受けて以降、生態系を基盤とした災害リスク軽減（Eco-DRR）による減災手法を確立することの重要性が高まっている。しかし、様々な海岸地形に注目してその差異を直接評価したものはない。そのため、本研究はスリランカの海岸線に存在する地形要素（潟湖、サンゴ礁、砂丘、海岸林）の効果を、津波の波高特性・海岸線の地形勾配特性に関連付けて定量的に評価することを目的として行ったものである。

博士論文は8章で構成され、第1章は既往研究のレビューに基づく研究目的の明確化、第2章はスリランカの海岸地形を分類した上での脆弱性評価、第3章は単一斜面の津波遡上現象、第4章は混合勾配斜面の津波遡上現象、第5章は斜面上に海岸林がある場合の津波遡上現象、第6章は砂丘上の海岸林が津波遡上に及ぼす影響評価、第7章はサンゴ礁海岸における津波遡上現象、第8章は結論という形で構成されている。

第2章ではスリランカ全土の海岸線において地盤高（DEM データ）、土地利用、減災要素となる地形分類（潟湖、海岸林、サンゴ礁）に注目して、2004年インド洋大津波の被害状況を居住域の位置特性との関係で整理している。特に、潟湖特性（縦横の長さ、潟湖開口部の状況）、海岸勾配、砂丘特性（長さ高さ）などが被害率に与える影響を評価している。GISを用いて統計的処理を行い、潟湖の開口部付近、砂丘上の家屋は特に被害率が高いこと、スリランカ東海岸では潟湖が閉じているタイプの被害が大きいことを示している。海岸林の位置には明確な関係はなかったが、密集したマングローブでは疎林や湿地よりは減勢できると考えられた。ラグーンタイプのサンゴ礁等では明確な効果は見いだせなかった。海岸勾配が急な潟湖では被害は少ない場合が多かったが、砂丘の高さは被害率を大きくさせ、潟湖の面積による影響は全くないという結果であった。実地形には様々な要素が絡んでいること、津波が対象構造物に当たる前に碎波しているかどうか影響を与えること、地点によって津波高さが異なること、またそれぞれの地形要素に対して代表的津波高としての精度が低いこと（その地点での津波高データが存在しない場合が多いこと）もあり、異なる地点のある要素だけに注目したGIS解析、統計解析では限界がある。そのため、GIS解析で抽出した地形特性をもとに、水理模型実験で詳細に現象解明を行うこととした。

第3章から第7章の研究は、埼玉大学内にある孤立波装置の水路内に、潟湖、サンゴ礁、海岸林、砂丘やその組み合わせのモデルを設置し、碎波現象の発生の有無に注目しつつ、陸域を模擬した斜面を遡上する津波高の変化を調べる形で水理実験を行った。砂丘の高さ、潟湖の長さ深さ、海岸林の有無などを主要なパラメータとして選定している。海岸林は千鳥状で底面上に配置した円柱群でモデル化した。単一斜面の遡上高の経験式の適合性を確認するため、2つの勾配を接続した型（複合斜面型）の模型実験も行った。サンゴ礁モデルは平坦型、サンゴ礁-潟湖混合型、法肩突起のあるサンゴ礁型を選定した。平坦型サンゴ礁の表面の凹凸のモデル化として、栈粗度を用いてその間隔を変化させることとした。

単一斜面としては、1/4、1/7、1/10勾配で実験を行った。複合型斜面では沖側が1/7、1/10で陸面勾配が1/4のケースを選定し、経験式の適合性を検証した。海岸林モデルは1/4、1/7勾配のものに設置した。潟湖モデルでは、沖側勾配として1/1、1/2、1/4、1/7、1/10を選定し、潟湖内部の水深も測定した。海岸林モデルを砂丘上にセットする位置は砂丘の沖側、頂部、岸側の3種類を選定した。サンゴ礁モデルでは沖側勾配1/7、陸面勾配1/4について、地形条件を変化させながら実験を行った。巻き波碎波、寄せ波碎波、碎波なし、が斜面部で、潟湖内部では碎波なしの波、先端波の碎波、段波などが波の透過波と潟湖の水深比に

よって発生した。樹林帯がある場合は複合的な波の反射やせき上げ現象が起きるなど複雑な現象を確認している。

実験では入力波の性質（波高水深比が 0.1 から 0.4）と模型を通過後の波の特性、遡上高の関係を測定し、碎波条件は既往研究と比較している。次元解析により代表的無次元数を抽出し、遡上高に与える影響を評価している。特に、遡上高に関して、既往研究のデータも含めて、様々な模型（斜面モデル、樹林あり斜面モデル、砂丘と潟湖モデル、種々のサンゴ礁モデル）に対して評価式を提案している。

実験の結果、最大遡上高は地形変化、碎波位置、砂丘を超えた後の潟湖やサンゴ礁平坦部での波の形成状態に大きく左右され、碎波条件付近で遡上高は最大になることを明らかにしている。また、サンゴ礁タイプの場合、サンゴ礁平坦部の長さが入力波の 1/4 程度の時に遡上高が最大になること、入力波の波高とサンゴ礁水深の比が碎波条件になり、それが遡上高の支配要因となること、サンゴ礁がラグーンタイプの場合、平坦タイプよりも遡上高は低いことなど重要な知見を見出した。

さらに、潟湖タイプに海岸林を導入した場合には、遡上高は大きく低減すること、サンゴ礁タイプの場合は表面粗度が粗い（サンゴ礁密度が低い） $k$ タイプの場合に遡上高は減少するが海岸林ほどではないこと、密集している  $d$ タイプの場合には遡上高の減少量は少なく平坦の場合と同様であること、など異なる地形間での比較を行っている。

これらのことから、潟湖の場合は砂丘高が高く海岸林がある場合にエネルギー減勢効果が高いことを示し、その効果を定量的に評価している。サンゴ礁の場合には、幅広で平坦部の水深が浅く、粗度要素としてのサンゴ密度が中程度の場合にその効果が大きくなることを示している。

以上のように、GIS で抽出した地形要素に関して水理模型実験をもとに、津波に対する地形要素や植生要素の効果を流れ現象としてとらえ、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、国内学術雑誌（土木学会論文集（水工学）に 2 本）、国際学術シンポジウム第 12 回 International Symposium on Ecohydraulics（日本）で発表済みである。