

海岸樹木の倒伏，抜根，折損に関する現地試験*

—インドネシアの Casuarina を例に—

秋田大学 松富英夫 埼玉大学 原田賢治
インドネシア BPPT Aloysius Bagyo Widagdo

1. はじめに

津波の減勢を目的とした海岸林の樹木は津波の流勢次第で倒伏，抜根，折損したりする。したがって，海岸林の津波減勢効果をより正確に推定するには，樹木の倒伏，抜根，折損といった被害限界を知っておく必要がある。また，対象樹木の幾何学的特性と力学的特性は，海岸林の津波減勢効果をより正確に推定するためばかりでなく，諸検証のために実施される水理実験での樹木模型の縮尺や比重，弾性係数，材料選択といったことにおいても必要である。

本研究は，津波の減勢を目的とした海岸林の実装をインドネシアで考えているため，対象樹種を Casuarina とし，先ずその幾何学的特性に関する現地調査結果を論じる。次に，力とモーメントから見た対象樹種の被害限界に関する現地試験結果を論じる。最後に，これらの結果を踏まえて，津波減勢効果などに関する水理実験における Casuarina 模型の検討例を示す。

2. 対象の海岸樹木

インドネシアで実装する海岸林の樹種は Casuarina とした。その例を図-1に示す。図の左は基本的に樹幹が1本で，高木となる Sea casuarina，図の右は根元近くで樹幹が複数に別れ，樹高が低い Shrimp casuarina である。Mangroveは，適用が河口域に限られるということで，対象としなかった。



図-1 対象の海岸樹木

3. 現地調査と現地試験の方法

Casuarina の幾何学的特性に関する現地調査はスマトラ中部西岸の Padang 近くの Painan と Pariaman，ジャワ中部南岸の Yogyakarta 近くの Pacitan, Samas, Kuwaru と Cilacap で実施した。調査項目は樹高 H ，樹冠高 (Crown height)，樹幹高 ((Branchless) trunk height)，胸高直径 D ，最大樹冠幅 B (樹冠部の下端とは限らない)，樹木間隔 (Tree interval) である (図-2)。

力学的特性に関する現地試験は Pariaman で実施した。測定項目はワイヤーとパワーショベルにより樹木へ載荷する水平または鉛直方向の力 F ，水平変位 δ ，胸高直径，最大樹冠幅，樹木の各高さ

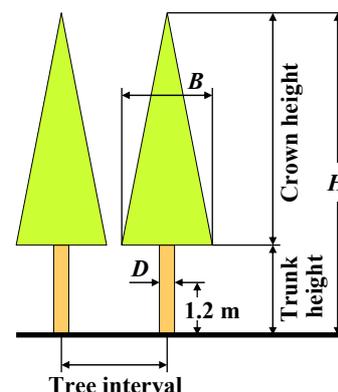


図-2 幾何諸元の調査項目

* Field test on the lodging, uprooting and breaking of coastal trees – Examples of casuarina in Indonesia – by Hideo MATSUTOMI, Kenji HARADA and Aloysius Bagyo WIDAGDO

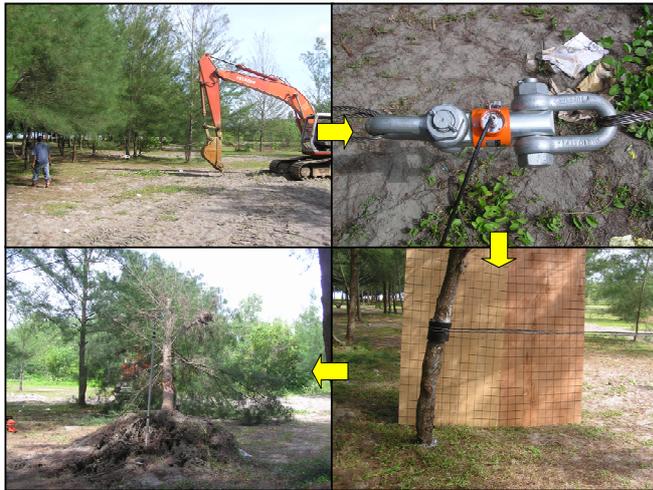


図-3 倒伏，抜根，折損の試験手順



図-4 鉛直抜根の試験手順



図-5 樹木の実質体積の測定法

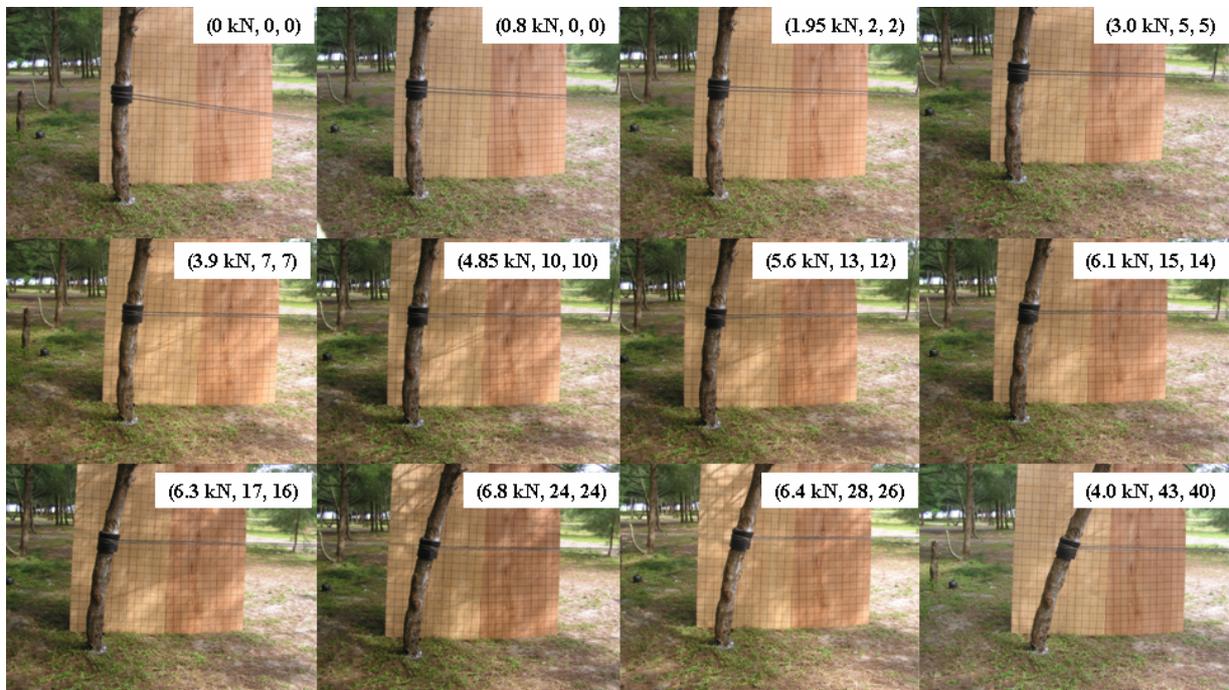


図-6 倒伏過程の時系列例 (Case 1)

における実質体積，抜根時の根部の深さ h_R と幅（短軸と長軸の2方向），樹幹の比重である（図-3）。力は引張型荷重計（東京測器研究所，定格容量 100 kN）で測定した。力の載荷点は地面から高さ 1.2 m の胸高直径測定部である。鉛直抜根の力の測定では胸高直径測定部に孔を開け，ワイヤーを通すことで，載荷点がずれないようにした（図-4）。水平変位は 10 cm 間隔の基盤目を対象樹木の横に設置し（図-3），各載荷荷重段階で撮影した写真から判読した。樹木の各高さにおける実質体積は，水を満たしたドラム缶に樹高の 1/10 に細分（ドラム缶に入らない場合はさらに細分）した樹木の実質部分を投入し，排除した後の水の減少量から評価した（図-5）。

図-6 は倒伏過程の時系列例を示す。各過程中の数値は左から水平力，地面から高さ 1.2 m での水平変位（cm），胸高直径測定部の水平変位（cm）である。この樹木は最終的に折損した。

4. 幾何学的特性

図-7 と 8 は各々樹高と胸高直径の樹齢への依存性を示す。以下、図-17 を除いた図-18 まで、凡例の四角は Sea casuarina, 三角は Shrimp casuarina である。樹齢は年輪からではなく、植林年から判断している。図から、樹木の幾何学的特性は樹齢でも表現可能であるが、各樹齢でデータの変動幅が大きく、樹齢は幾何学的特性のよい説明変数とは言い難い。

図-9～12 は各々樹高、樹冠高、樹幹高と最大樹冠幅の胸高直径への依存性を示す。樹齢の場合に比べてデータのまとまりがよく、幾何学的特性は Casuarina においても胸高直径でよく表現できると言える。また、Sea casuarina と Shrimp casuarina の幾何学的特性の違いが明瞭である。

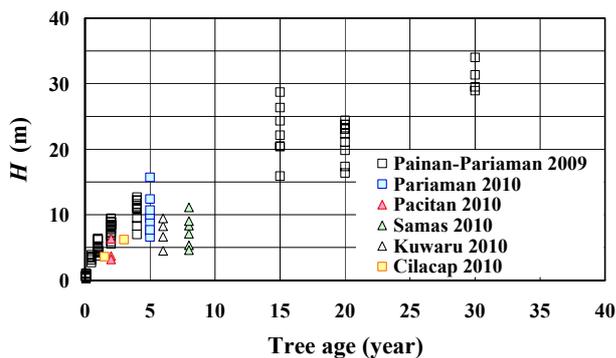


図-7 樹高 H と樹齢の関係

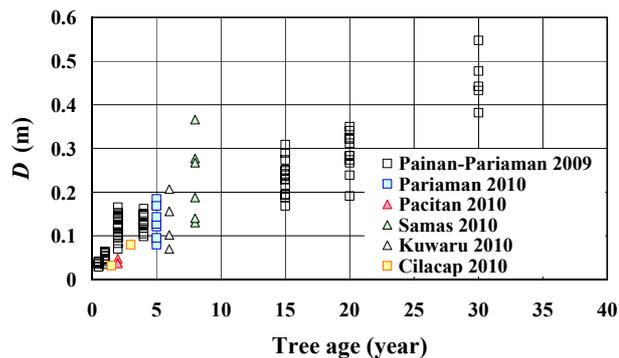


図-8 胸高直径 D と樹齢の関係

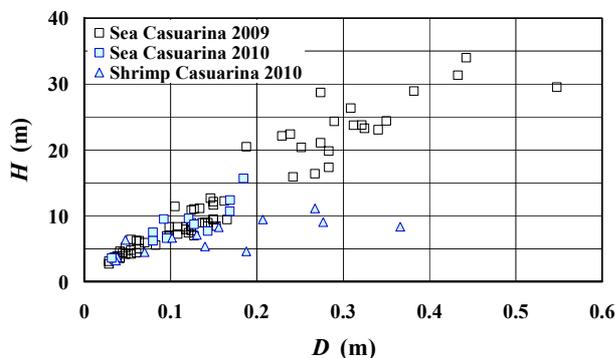


図-9 樹高 H と胸高直径 D の関係

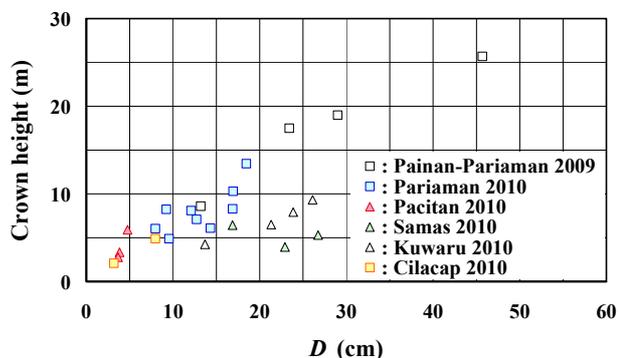


図-10 樹冠高と胸高直径 D の関係

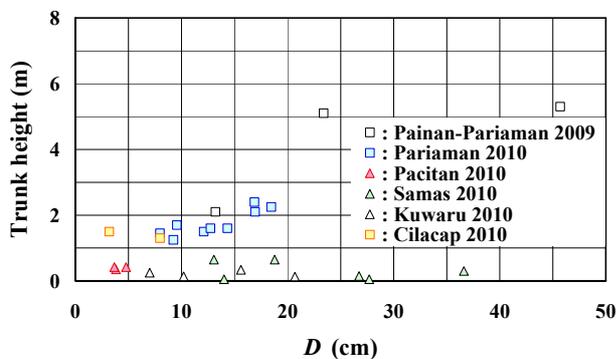


図-11 樹幹高と胸高直径 D の関係

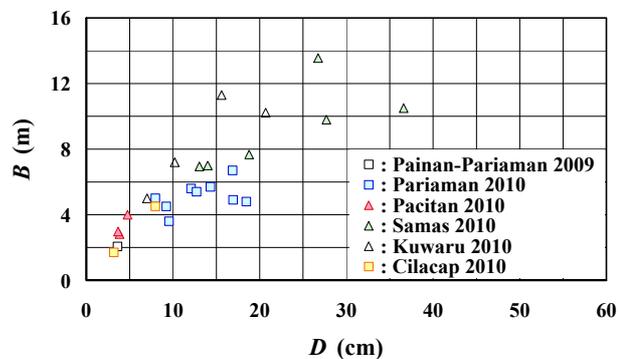


図-12 最大樹冠幅 B と胸高直径 D の関係

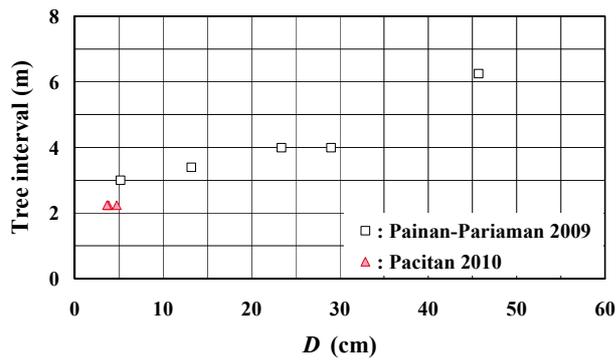


図-13 樹木間隔と胸高直径 D の関係

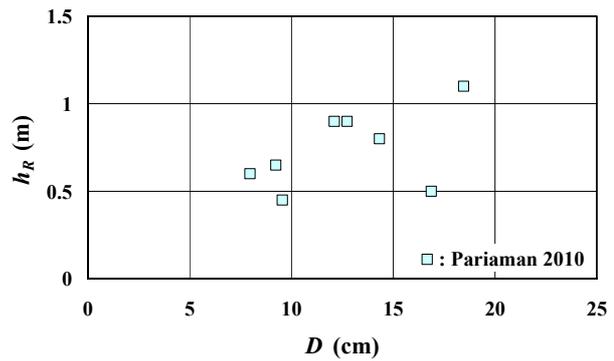


図-14 根部の深さ h_R と胸高直径 D の関係

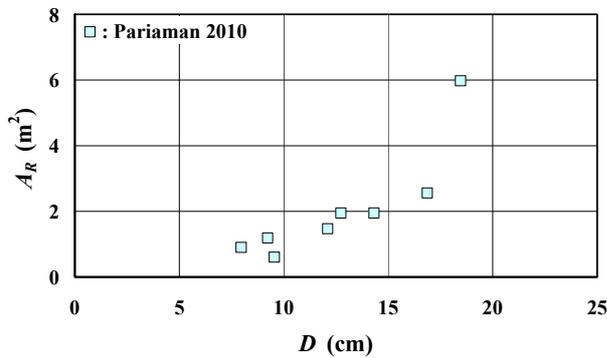


図-15 根部の平面積 A_R と胸高直径 D の関係

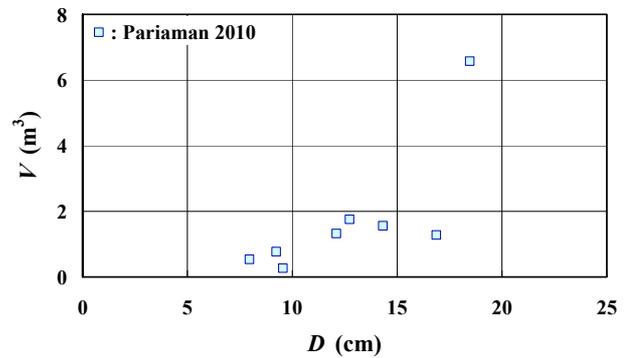


図-16 根部の体積 V と胸高直径 D の関係

図-13 は樹木間隔の胸高直径への依存性を示す。植林された樹木なので、胸高直径の増大につれて、樹木間隔は間伐により段階的に増大すると考えられる。図によると、約 2 m の整数倍で樹木間隔が増大しているように見える。段階的に増大していないとすれば、Casuarina の植林における樹木間隔の基準はなく、経験に頼っているとわざるを得ない。

図-14~16 は各々抜根時の根部の深さ、地面での平面積（短軸長×長軸長）と体積（短軸長×長軸長×深さ）の胸高直径への依存性を示す。図から、根部の深さはほぼ D^1 、平面積は D^m ($m>1$)、体積は D^n ($n>m>1$) に依存していることが判る。

図-17 は Sea casuarina の各高さ z （樹高を 10 等分）における実質体積を直径 D の円柱に換算して表現したときの D の鉛直分布を示す。ただし、 D の最大値 D_{max} で正規化されている。Sea casuarina は地面から樹高の 4 割あたりで最大の実質体積を持つようである。参考までに、樹冠部の下端は地面から樹高の 2 割弱あたりである（図-9 と 11）。

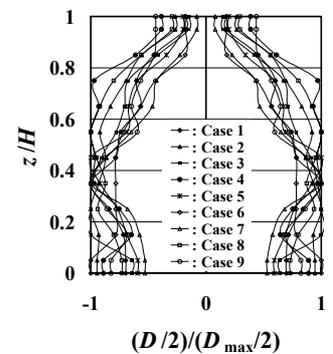


図-17 樹木の実質体積

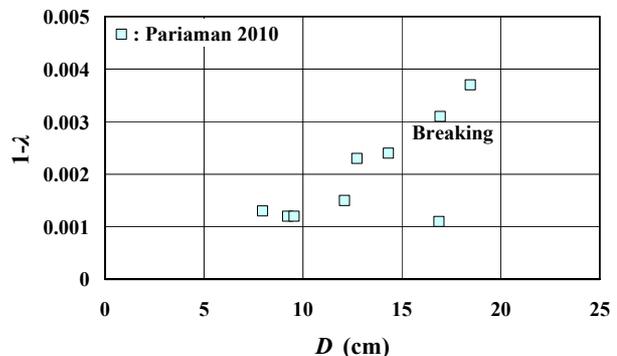


図-18 樹冠部の空隙率 λ と胸高直径 D の関係

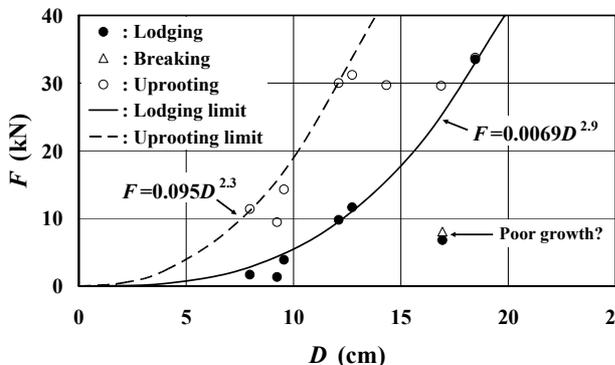
図-18 は、樹冠部の全実質体積と樹冠部を円錐と仮定したときの体積から算定した、樹冠部平均の空隙率 λ の胸高直径への依存性を示す。図から、Sea casuarina の樹冠部の実質体積は 0.1~0.4% (樹冠部を円柱と仮定すればこの 1/3) 程度、逆に空隙率は 99.6~99.9% 程度で、実質体積は胸高直径の増大とともに増大する傾向にあることが判る。

5. 力学的特性

図-19 は水平力 F と水平変位 δ の関係を示す。変位は地面から高さ 1.2 m のもので、ワイヤーを巻いた胸高直径測定部のものではない。図から、弾性領域の存在が認められる。どちらの変位を採用しても、以下に述べる合成弾性係数 E に差がないことは確認した。

図-20 は樹木を片持ち梁と仮定し、弾性限度内の水平力と水平変位を用いて評価した弾性係数 E である。地盤の変形を含めてのものであり、この弾性係数は地盤と樹幹の合成弾性係数と解釈すべきものである。合成弾性係数は平均で 272 kN/cm^2 ($27,700 \text{ kgf/cm}^2$) であり、日本の黒松の弾性係数の 1/3 程度、コンクリートの弾性係数の 1/10 程度である。

図-21 は合成弾性係数の胸高直径への依存性を示す。胸高直径 (樹齢) が増大 (増加) するにつれて、合成弾性係数はやや小さくなる傾向にある。



(a) 力から見た場合

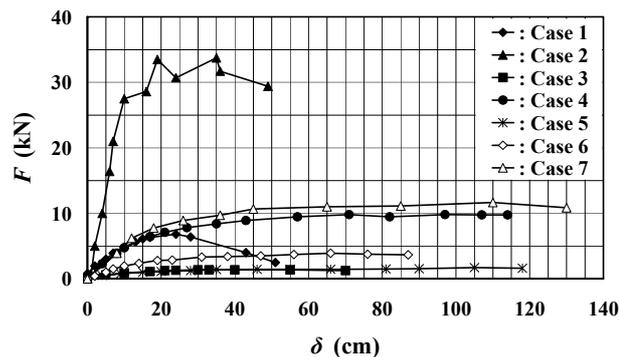


図-19 水平力 F と水平変位 δ の関係

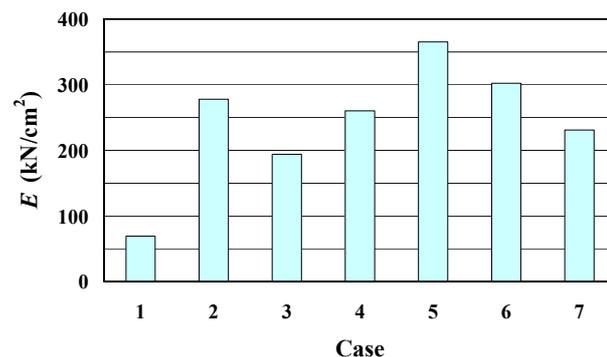


図-20 各試験ケースにおける合成弾性係数 E

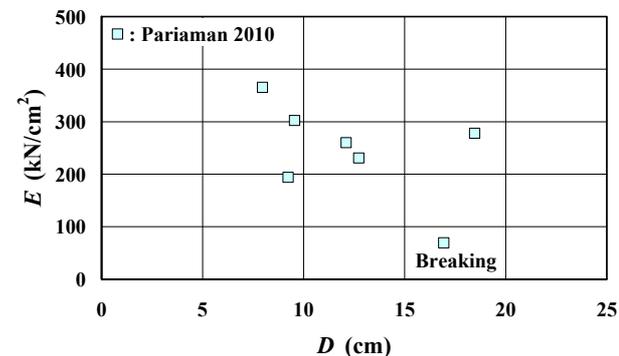
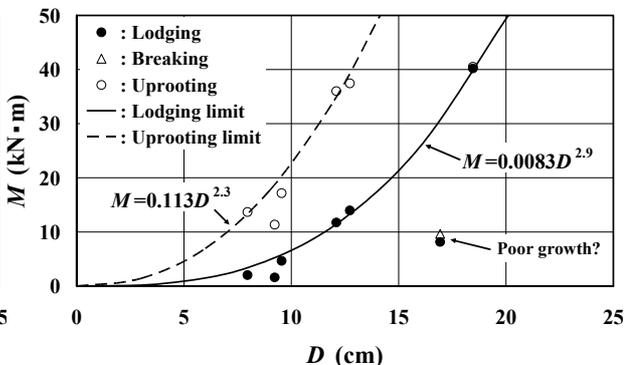


図-21 合成弾性係数 E と胸高直径 D の関係



(b) モーメントから見た場合

図-22 Sea casuarina の被害限界に関する現地試験結果 (Pariaman)

図-22(a)と(b)は Sea casuarina の被害限界に関する現地試験結果を示す。各図中の2曲線は倒伏時(実線)と抜根時(破線)の水平力やモーメントの上限を示すが、データ数が少なく暫定的なものである。倒伏時の水平力やモーメントはほぼ D^3 に依存している。倒伏時の地盤反力を円弧すべりによるせん断力とすれば、すべり面の面積は D^2 に比例し(図-15)、円弧の半径は D^1 に比例する(図-14)と考えられるので、モーメントは D^3 に依存することになる。風によるカラ松の根返りに対して、同じような式が提案されている(島田, 2009)。

図-22(a)の胸高直径 14~16 cm にかけて抜根データのみのものである。これらは鉛直方向の力を載荷した場合のものである。図から、鉛直抜根時と他の斜め抜根時の力はほぼ同じか、後者が大きめであることが判る。

折損のデータは1つ(Case 1)しか得られなかった。しかも、樹幹の根元近くに弱点があったためか、非常に弱い水平力やモーメントで倒伏後、すぐに折損した。折損は、樹幹に弱点が存在する場合ばかりでなく、曲げモーメントやせん断力でも生じ得る。今後、水平力の載荷点を胸高直径測定部より高くするなどして、折損のデータを収集し、その限界を検討する必要がある。

6. 樹木模型の検討

前章までの幾何学的特性と力学的特性に基づいて、津波減勢効果に関する水理実験を実施する場合の Casuarina 模型の検討を行う。津波減勢機能の継続性(Casuarina の寿命は 40 年程度)を考慮し、海岸林として純林かつ複層林を想定する。汀線での津波の高さが 3.3 m、周期が 15 分の場合、Casuarina では樹齢 5 年ものが津波の減勢に最も効果的である(原田ら, 2010)。したがって、高さの低い林帯に樹齢 5 年ものを想定して検討を行う。

表-1 に検討結果例を示す。原型の樹高は 10 m、胸高直径は 0.15 m、比重は 1.28、弾性係数は 272 kN/cm^2 を、実験水路は長さ 30 m 程度を想定している。弾性係数の相似則には Matsutomi ら(2007)のものを用いた。この相似則は樹冠部の枝にも適用できる(今井・松富, 2008)。

表-1 Casuarina 模型の検討例

	Prototype	Model 1 (1/100)	Model 2 (1/200)	Remarks
Tree height (m)	10	0.1	0.05	
Crown height (m)	8	0.08	0.04	
Breadth (m)	6	0.06	0.03	
Diameter (m)	0.15	0.0015	0.00075	
Specific gravity	1.28	1.28	1.28	
Modulus of Elasticity (kgf/cm ²)	27,700 (2.72 GPa)	277 (27.2 MPa)	139 (12.6 MPa)	
Inundation depth (m)	5	0.05	0.025	0.3 → 0.05 0.2 → 0.03
Flow velocity (m/s)	4.2	0.42	0.297	
Drag force (kgf/m)	153 (1.50 kN/m)	0.0153 (0.150 N/m)	0.00382 (0.037 N/m)	$\rho=1030 \text{ kg/m}^3$ $C_D=1.1$
Deflection at water surface (m)	1.74	0.0174	0.0086	

表-2 模型材料の特性値

Material	Specific gravity	Modulus of Elasticity (kgf/cm ²)
80°	1.49	73.0 (7.15 MPa)
70°	1.01	54.8 (5.37 MPa)
60°	0.88	33.6 (3.29 MPa)

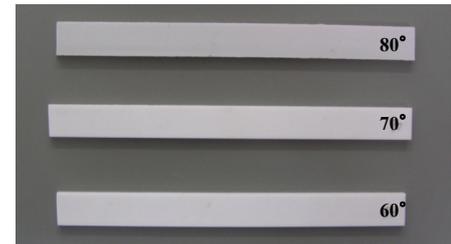


図-23 Casuarina 模型の材料

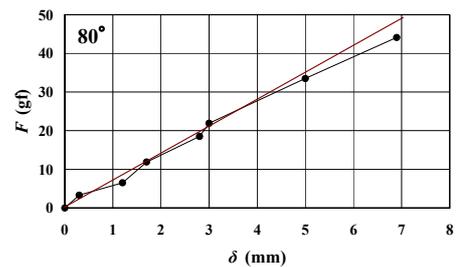


図-24 力 F と鉛直変位 δ の関係

氾濫流速の推定には Matsutomi & Okamoto (2010) の推定式を用いた。表中の (0.3 → 0.05) は、長さ 30 m の実験水路において、水路上流端から長さ 15 m にわたって 0.3 m 貯水したときのゲート急開流れの陸上部での氾濫水深は 0.05 m 程度であることを示す。ただし、陸上部の高さは水路底から 0.15 m、その前面は斜面と水平底からなり、水平底での静水深は 0.07 m である。

Casuarina 模型の材料として硬度 80°~60°の低比重シリコンゴムを用意した (図-23)。これらの材料特性値を表-2 に示す。弾性係数は曲げ弾性係数であり、高さ 20 mm、幅 5 mm、支間 100 mm の供試体を用いて評価した (図-24)。表-1 と 2 から、想定した実験水路では縮尺 1/200、硬度 80°以上の低比重シリコンゴムの Casuarina 模型が推奨される。

7. おわりに

本調査研究で得られた主な結果は次の通りである。①Casuarina の幾何学的諸元に関する基礎データを収集し、その特性を検討した。幾何学的特性は、Casuarina においても、胸高直径でよりよく表現できることを確かめた。②Casuarina の倒伏、抜根、折損に関する現地試験を実施した。倒伏と抜根についてはその限界式を提示した。③斜め抜根時と鉛直抜根時の力はほぼ同じか、前者が大きめであることを確かめた。④Casuarina 林の津波減勢効果に関する水理実験を実施する場合の Casuarina 模型の縮尺、比重、弾性係数、材料について検討例を示した。

謝辞：本調査研究は JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力「インドネシアにおける地震火山の総合防災策」(研究代表 佐竹健治) と科学研究費補助金(基盤研究(C))「津波被害の軽減を目的とした植生の実装に関する基礎的研究」(研究代表 松富英夫) として行われた。

参考文献

- 今井健太郎・松富英夫：樹冠部の変形を考慮した樹木の抵抗則とそれを用いた沿岸林域の氾濫計算，土木学会論文集 B，Vol.64, No.3, pp.214-225, 2008.
- 島田宏行：カラマツの風害に関する力学的評価，日林誌 91, pp.120-124, 2009.
- 原田賢治・松富英夫・A. Bagyo Widagdo：海岸林の生長による津波減衰効果の検討と管理手法の提案 —インドネシア沿岸における適応性の検討—，第 29 回日本自然災害学会講演概要集，pp.75-76, 2010.
- Matsutomi, H., Ohnuma, K., Suzuki, A. and Imai, K.: Governing equations for inundated flow in vegetated area and similarity law for trunk, Proc. of 30th Intl. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp.1638-1650, 2007.
- Matsutomi, H. and Okamoto, K.: Inundation flow velocity of tsunami on land, *Island Arc*, Vol. 19, Issue 3, pp.443-457, 2010.