現地試験に基づく東北地方太平洋沖地震津波浸水域における 黒松の特性と被害条件

Characteristics and Damage Condition of Black Pine Tree Based on Field Test in the Inundation Area of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami

松富英夫¹・原田賢治²・星 孟志³・齋藤可織⁴・決得元基⁵

Hideo MATSUTOMI, Kenji HARADA, Takeshi HOSHI, Kaori SAITOH and Genki KETTOKU

Basic geometric and dynamic characteristics as well as macroscopic damage condition such as the lodging, uprooting and breaking of coastal black pine tree in the inundation area of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami are examined through field tests. The damage condition is discussed in terms of the horizontal force F and moment M acting on each tree, and compared with those of Casuarinas (Sea Casuarina and Shrimp Casuarina) which are typical trees for the tsunami energy reduction in Indonesia. Moreover, the tsunami energy reduction performance of the three species is roughly graded through examination of inundation depth for which the three can withstand and comparison of their basic characteristics and damage condition.

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波（以下「本津波」）では、三陸の海岸林は壊滅的であったが、仙台平野や青森県三沢の海岸林はある程度の津波減勢効果を発揮した。それらの事例を図-1に示す。図中、 D は胸高直径、 κ は植生密度（松富ら，2004）， h は津波浸水深， Z はDL基準の津波浸水高である。仙台市東浦の海岸林が残った場所の陸側背後では、浸水深が25%（ $=1-3.14/4.16$ ）程度低減した。海岸林には、その奥行が220 m程度あっても、この程度の低減しか期待できない（松富ら，2012）。

津波の事前対策では海岸林は二次的な防災施設に位置づけられる。海岸林を津波減勢の目的で積極的かつ計画的に活用する場合はその幾何・力学特性や被害（倒伏、抜根、折損）条件を十分に知っておく必要がある。

本研究は本津波の浸水域における黒松を対象に、その基本的な幾何・力学特性や被害条件を現地試験に基づいて論じる。被害条件については、インドネシアにおける津波減勢林の代表樹木であるCasuarinas（Sea Casuarina, Shrimp Casuarina）（松富ら，2011）と比較検討し、三者の津波減勢林としての性能の大まかな位置付けも行う。

2. 現地試験

黒松の幾何・力学特性、被害形態と被害条件に関する現地試験は岩手県の宮古市田老字向山（2011年12月6～

(a) 陸前高田市の壊滅した海岸林 ($D=0.07-0.87$ m, $\kappa=0.62-0.65\%$)

(b) 仙台市東浦の海岸林(幅140 m, 奥行220 m, $D=0.17-0.65$ m)

図-1 海岸林の限界例と効果例 ((b)はGoogle Earthに帰属)

9日 (Case 1～13)．津波被災後に枯死)と山田町船越浦の浜 (2012年5月11～13日 (Case 14～26), 6月15～17日 (Case 27～46)．津波被災後も生存)で行った．両試験地を図-2, その遠景を図-3に示す．両試験地の地盤は砂質で、地震による地盤沈下量は一等水準点とともに0.4 m程度 (国土地理院, 2011), 試験期間中の日最大と日最小の潮差 (宮古)は127 cmと67 cmである (気象庁, 2012)．

Casuarinasの幾何・力学特性、被害形態と被害条件に関する現地試験はスマトラ島中部西岸のPadang近郊

1 正会員	工博	秋田大学工学資源学部地域防災力研究センター長
2 正会員	博(工)	静岡大学防災総合センター准教授
3		宮城県土木部
4		青森県土木整備部
5 学生員		秋田大学大学院工学資源学研究科

図-2 海岸黒松の特性と被害条件の現地試験地

(a) 岩手県宮古市田老字向山の海岸林

(b) 岩手県山田市船越浦の浜の海岸林

図-3 現地試験地の遠景

図-4 樹木の幾何諸元の定義と記号

(2010年9月21～23日, Sea Casuarina) とジャワ島中部南岸のYogyakarta近郊(2011年9月21～24日, Shrimp Casuarina)で行った。両試験地の地盤は粒径の細かい砂質である。

測定項目はワイヤー、滑車とパワーショベルを用いて樹木へ載荷する水平力 F 、水平載荷力毎の樹木の水平変位、樹高 H 、樹幹高 H_T 、胸高直径、抜根時の根部の深さ h_R と幅（長軸と短軸の2方向）、水平力載荷樹幹部の比重 S 、地下水面から地表面までの高さ h_G である。樹木の幾何諸元の定義と記号を図-4に示す。力は引張型荷重計（（株）東京測器研究所、定格容量100kN（Case 1～26）、200kN（Case 27～46））で測定した。力の載荷点は基本

図-5 試験黒松の樹高 H

図-6 試験黒松の胸高直径 D

図-7 胸高直径部または荷重載荷樹幹部の比重 S

的に地表面から高さ1.2 mの胸高直径測定部 (Case 39~41は2.4 m, Case 42と44は3.6 m, Case 43, 45, 46は4.8 m) である。載荷中に載荷点のワイヤーが滑らないように載荷部の樹幹に切れ込みを入れた。水平変位は10 cm 間隔に目盛った測量ポールを樹木のそばに設置し、載荷力毎の写真から判読した。ポール、樹木、撮影点の各間隔も測定した。

3. 現地試験結果

(1) 幾何・力学特性

図-5～8と10, 11にCase毎の樹木の樹高, 胸高直径, 水平力載荷樹幹部の比重, 根部の深さ h_R , 地下水面から地表面までの高さ h_G , 根部の平面積 A_R (=長軸長×短軸長)と体積 V_R (= $A_R \times h_R$), 合成弾性係数 E (松富ら, 2011)および水平力(□: 水平外力, ●: 水平耐力)を示す。

図-5～7によると、試験黒松の樹齢（年輪から判定）

図-8 根部深さ h_R と地下水面と地表面間の高さ h_G

図-9 試験時の潮位と根部の状況例 (宮古, CDL=TP-80.6 cm)

は60～70年とはほぼ同じで、樹高は21 m程度、胸高直径は0.23～0.48 m、比重は0.8程度(枯死木はやや小さい)である。

図-8から、根部の最深点は地下水面下0.1～1.3 mと判断される。根部のこの深さについては地震後の地盤沈下量(0.4 m程度)や地盤の種類、汀線からの距離、潮差、地表面位置の判断ミスによる測定誤差(0.2～0.4 m程度)などを考慮する必要がある。図-9に試験時の潮位 η (矢印時に地下水面から地表面までの高さを測定)(気象庁, 2012)や地表面位置の判断ミスによる測定誤差例(写真中に表示)を示す。図-8から理解されるように、地震後の地盤沈下量と測定誤差を考慮するだけで地下水面から地表面までの高さが0.4～0.8 m程度改善され、地下水面から地表面までの高さは根部の深さと同程度となる。

図-6, 8, 10, 11から、胸高直径が増加するにつれて、換言して成長がよい樹木ほど、根部の深さと合成弾性係数はやや減少、根部の平面積と体積は増加し、根部がふっくらとしてくると言えよう。根部の深さと合成弾性係数が同じ傾向を持つことは両者の密接な関係を示唆する。根部の深さが減少すれば、根部の円弧すべり半径が減少するため、合成弾性係数も減少すると考えられる。

図-11によると、①胸高直径が大きいからといって、倒伏耐力が常に大きいとは限らず、②倒伏耐力が大きいからといって、合成弾性係数が常に大きいとも限らない。

図-12と13に根部諸量と水平力(F_L :倒伏耐力, F_U :

図-10 試験黒松の根部の平面積 A_R と体積 V_R 図-11 試験黒松の合成弾性係数 E と水平力 F

抜根耐力)、胸高直径と根部諸量の関係を示す。両図から、①1次元よりも3次元というように情報量が多いほど、また抜根耐力の方が、根部諸量と耐力の相関は高い、②データ数(範囲)が少ない(狭い)ためか、胸高直径と根部深さの相関が不明確であることが判る。②には試験樹木の樹齢がほぼ同じということや根部深さの測定(図-9中の右上写真参照)のバラツキも原因していよう。

(2) 被害条件

図-14と15に胸高直径、水平力、モーメント M と被害形態の関係を示す。両図にはインドネシアのSea Casuarinaに対する現地試験に基づいた倒伏(実線)と抜根(破線)の上限条件も示してある。図-15には「抜根耐力×力の初期載荷点高さ」として評価した抜根時の仮想モーメントのデータが含まれている。両図から、①平均的に抜根耐力($\sim 430D^{1.7}$) > 折損耐力($\sim 170D^{1.2}$) > 倒伏耐力であるが、胸高直径毎の上限耐力はどの被害形態でもほぼ同じである、②この上限耐力はSea Casuarinaの上限倒伏耐力の8割程度である、③抜根耐力が倒伏耐力より小さい場合が少なからずある、④平均的に折損モーメント($\equiv$ 抜根時の仮想モーメント)($\sim 3500D^{3.2}$) > 倒伏モーメント($\sim 920D^{2.2}$)であることが判る。①と④における耐力とモーメントの大小関係は現地試験データに対する初歩的な回帰曲線結果(一部は後述)に基づいている。②は既報(松富ら, 2012)の現地調査に基づく推定結果と同じ傾向である。②にはデータ(胸高直径)の範囲、樹冠部の豊かさや気象(特に風)の違いが原因しているかもしれない。③も既報の現地調査結果と同じ

図-12 根部諸量と水平力 F の関係（黒松）

図-13 胸高直径 D と根部諸量の関係

傾向である。③の理由として、地下水位を含めた地盤条件の他に、倒伏段階における横方向に張った主要な横根の破断が考えられる。

本津波により陸前高田市高田松原海岸の黒松（ $D=0.07 \sim 0.87\text{m}$, $\kappa=0.62 \sim 0.65\%$ ）や赤松は2本を残して全てが倒伏、抜根や折損した（図-1(a) 参照）。この海岸における浸水深は11.6m程度で、ほとんどの松は水没しなかったにもかかわらず、このような被害を受けた。

図-16に黒松の胸高直径と樹高、被害有無（Damaged, Withstood）の境界浸水深 h （破線（松富ら、2012））の関係を示す。図中のデータは本津波に持ち堪えた本研究の試験黒松である。陸前高田市の事例や図-16から、津波

図-14 胸高直径 D 、水平力 F と被害形態の関係

図-15 胸高直径 D 、モーメント M と被害形態の関係

図-16 胸高直径 D 、樹高 H 、被害有無の境界浸水深 h の関係

先端部衝突時の衝撃的な波力による最前列樹木の折損被害（松富・中下、2012）を除けば、黒松は樹高の35%程度以下の浸水深であれば持ち堪えたと判断される。

(3) 津波減勢林としての黒松の性能

Sea Casuarina, Shrimp Casuarinaと黒松の外観例を図-17、胸高直径と樹高の関係を図-18に示す。3樹種の樹冠部の形状や枝葉の密生度、樹幹高、樹高は異なる。Shrimp Casuarinaの樹高は10m強で頭打ちとなる。

図-19～21に胸高直径とそれぞれ倒伏耐力、抜根耐力、倒伏モーメントの関係を示す。各図中には樹種毎に初歩的回帰曲線が示されている。ただし、 D のべき指数が1未満のものは表示していない（図-19と20参照）。これらの図から、Sea CasuarinaとShrimp Casuarinaの耐力や倒伏モーメントは同傾向で、黒松のものより大きいことが判る。これらの傾向は根部の特性や合成弾性係数についても言えたことを断っておく（齋藤・松富、2013）。

図-17 Sea Casuarina (左), Shrimp Casuarina, 黒松 (右) の外観

図-18 胸高直径 D と樹高 H の関係

図-16で論じた黒松が持ち堪えられる浸水深や各樹木の被害条件, 合成弾性係数, 樹冠部の形状, 枝葉の密生度, 樹幹高, 樹高から総合的に判断して, 津波減勢性能は3樹種ではShrimp Casuarinaが高いと推定される。

4. おわりに

限られた地点と条件の現地試験に基づくが, 本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- ①海岸黒松の被害形態による被害条件の違いは力よりもモーメントの観点でより明確に認められ, 平均的に折損モーメント>倒伏モーメントである。
- ②力の観点における被害形態による被害条件の違いは平均的に抜根耐力>折損耐力>倒伏耐力である。ただし, 胸高直径毎の上限耐力はどの被害形態でもほぼ同じで, Sea Casuarinaの上限倒伏耐力の8割程度である。
- ③津波先端部衝突時の衝撃的な波力による最前列樹木の折損被害を除けば, 海岸黒松は樹高の35%程度以下の浸水深であれば持ち堪える。
- ④被害条件や合成弾性係数, 樹高, 樹冠部の枝葉の密生度, 樹木が持ち堪えられる浸水深を総合して考えると, 津波減勢性能は3樹種ではShrimp Casuarinaが高い。海岸林の被害は地盤条件や海岸林の分布形状, 津波の来襲方向にも依存する。これらの件は今後の課題である。

謝辞: JST-JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力 (佐竹健治), 科学研究費 (基盤研究 (C)), 21510187, 24510244 (松富英夫) と北東北国立3大学連携推進研究プロジェクト (堺 茂樹) の補助を受けた。現地試験では岩手県農林水産部森林保全課 千葉一弘氏と宮古農林振興センター 多田広之氏にお世話になった。記して謝

図-19 胸高直径 D と倒伏耐力 F の関係 図-20 胸高直径 D と抜根耐力 F の関係 図-21 胸高直径 D と倒伏モーメント M の関係

意を表する。

参考文献

- 気象庁: <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php?stn=MY>, 2012.07.20参照。
- 国土地理院: <http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun60008.html>, 2011.04.14参照。
- 齋藤可織・松富英夫 (2013): 津波減勢に活用される日本とインドネシアの海岸樹木の特性比較, 土木学会東北支部発表会, II-68。
- 松富英夫・大沼康太郎・今井健太郎 (2004): 植生域氾濫流の基礎式と植生樹幹部の相似則, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.301-305。
- 松富英夫・原田賢治・A. B. Widagdo・S. Diposaptono (2011): Casuarinaの倒伏・抜根条件と2010年Mentawai地震津波でのその検証, 土木学会論文集B2, Vol. 67, No. 2, pp.301-305。
- 松富英夫・中下明洋 (2012): 2011年東北地方太平洋沖地震津波における海岸林の諸相, 土木学会東北支部発表会, II-48。
- 松富英夫・山口枝里子・直江和典・原田賢治 (2012): 東北地方太平洋沖地震津波における鉄筋コンクリート造建物と海岸黒松の被害条件, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp.351-355。