海岸樹木の津波耐力評価手法の高度化

Advanced Evaluation Method for Tsunami Resistance of Coastal Tree

今井健太郎¹・原田賢治²・南 幸弘³・川口誠史⁴・二宮栄一⁵

Kentaro IMAI, Kenji HARADA, Yukihiro MINAMI, Seiji KAWAGUCHI and Ei-ichi NINOMIYA

This study proposes an advanced evaluation method to assess the capacity of lodging trees to resist tsunami, considering environmental conditions such as root depth and tree density. Field experiments aimed at determining the resistance force of lodging trees were carried out. The results indicate that the critical moment of lodging trees corresponds to the bending strength of the trunk, the section modulus measured at chest height, and are related to the parameter β (representative of tree growth environment). The correlation between field measurements and the estimated value was better than the ones previously obtained. β depends on the diameter of trees at chest height, tree density and sand thickness above the top of the roots. Therefore, increasing sand thickness on top of the roots appears to be one of the strengthening methods which will maintain tree stability. However, it should be noted that the method can be applied only to *Pinus thunbergii*.

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波において、東北地方の海岸林に壊滅的な被害が生じた(国総研, 2013)。仙台湾沿岸では、海岸林を利用した津波減勢策の検討も行われていた(今井ら, 2009)。ただし、想定地震津波の最大クラスは869年貞観地震津波であったため、今次津波に相当する海岸林の被害予測までには至らなかった。巨大津波災害に対して海岸林はほとんど無力であり、被害リスク管理が必要といえる。

津波の規模や条件によっては、海岸林は流勢緩和や漂流物捕捉などの減災効果を持つことが知られている(今井ら, 2012; 坂本ら, 2012)。1946年昭和南海地震津波における和歌山県広村の事例においては、黒松が漁船を捕捉し、市街地への流出を食い止めた。さらに、黒松林と土堤が津波の流勢を緩和し、背後の家屋流出を抑制した。2004年インド洋津波以降、海岸林による津波減災に関する研究例は活発に行われてきた(例えば、原田・今村, 2003)。一方で、海岸林被害に関するリスク評価を主眼とした研究例は一部にとどまっている(例えば、今井・松富, 2008)。

黒松に代表される海岸樹木の倒伏耐力についての研究例として、今井・鈴木(2005)により実施されており、河道内樹木における倒伏モーメント評価式に対する海岸樹木への適合性を確認している。しかし、限られた群生環境での評価であることや、胸高直径で一義的に倒伏モーメントを評価しているため、その評価値にはばらつき

図-1 入野松原における調査測線位置

も多いことが課題であった。

本研究では、海岸林被害リスク評価の高度化を目的として、高知県黒潮町入野松原において林相調査と樹木引き倒し試験を実施し、群生環境を考慮した倒伏モーメント評価式を提案する。さらに、本提案の評価手法から現況の黒松林に対する倒伏モーメントや引き抜き耐力に関する強化法について検討する。

2. 入野松原の林相調査

樹木の倒伏耐力評価には、樹木単体の諸元も重要であるが、群生環境についても重要な因子になり得る。仙台湾平野においては、地下水位と直根の発達の関係性が根張り・抜根の主たる原因と考えられており、標高0.4 m以下の地盤に群生していた黒松は根型が根張り・抜根に弱い水平根型に発達したために残存率は低いと報告がある(国総研, 2013)。また、樹木占有率 κ (%)は根の水平方向発達に関連性があると考えられるからである。

江戸期以降に造成が始まった当該地域の松原は、1707年宝永地震、1854年安政地震と、津波による大きな被害

1 正会員 博(工) 東北大学助教 災害科学国際研究所
2 正会員 博(工) 静岡大学准教授 防災総合センター
3 (株)アジア航測
4 高知工科大学大学院
5 高知県幡多林業事務所次長

図-2 測定項目の定義

図-5 引き倒し試験方法の概略

写真-1 引き倒し試験の様子 (No. 12)

図-3 調査測線における D_c と H_t の頻度分布

表-1 各調査測線における平均的な海岸林諸元

Line No.	D_c , cm	H_t , m	H_{tr} , m	κ , %	$D_c n$
Line 1	9.0	6.0	1.4	0.38	414.6
Line 2	12.3	9.2	2.9	0.25	430.7
Line 3	13.2	8.6	2.9	0.60	276.3
Line 4	19.4	13.3	4.5	0.32	386.3
Line 5	14.6	9.3	3.5	0.28	131.5

図-4 調査測線樹木の D_c と H_t/D_c 、および樹冠長率の関係 図-6 水平変位量 D_{ef} と作用モーメントの関係

1に示すLine 2, 4はブナなどの広葉樹種との混成林となっている状況にある。

図-1に調査対象域と調査測線の位置を示す。調査測線としては、Line 1, 3, 5は林帯幅における沿岸方向単位幅に含まれる樹木を調査対象とした。Line 2, 4は10 m四方の枠取り調査を各測線毎に3カ所設けて調査した。

図-2に測定項目の定義を示す。 D_c は胸高直径、 H_t は樹高、 H_{tr} は枝下高、 D_r は根上部的被砂層厚を示す。 D_t と根元の地盤高は引き倒し対象樹木のみ測定を行った。

図-3に調査測線における D_c と H_t の頻度分布を示す。図から、当該地域において D_c は10 cm程度、 H_t は6 m程度を中心に分布していることがわかる。表-1に各調査測線における平均的な林相諸元を示す。表中の $D_c n$ は首藤(1985)の植生厚みを示し、 n は沿岸方向単位幅あたりの立木本数、胸高直径の単位はcmである。調査対象の林

を受けてきた。その後、当時の領主が入野周辺の住民に年に数本ずつ植林を命じて、現在の黒松林が復旧された。現状はマツ材線虫病により半数近くの黒松が枯死し、図-

表-2 引き倒し試験を実施した樹木の諸元

Tree No.	Transect Line	Latitude, deg	Longitude, deg	Ground height, T.P. m	D _c , cm	M _c , kNm	N _c , kN	Dr, m
1	1	33.02770	133.02147	5.7	13.2	6.3	NaN	0.10
2	1	33.02772	133.02148	5.8	8.1	1.7	NaN	0.06
3	1	33.02803	133.02103	4.4	10.3	5.2	NaN	0.14
4	1	33.02845	133.02062	3.0	22.0	49.2	NaN	0.17
5	1	33.02840	133.02073	3.2	12.7	10.8	NaN	0.19
6	2	33.02804	133.02065	3.4	16.7	24.8	NaN	0.15
7	2	33.02902	133.01890	3.9	19.6	24.3	NaN	0.14
8	2	33.02958	133.01775	4.6	8.3	2.5	NaN	0.16
9	4	33.02563	133.01500	6.4	14.5	15.7	10.9	0.15
10	5	33.02150	133.01517	6.0	11.5	5.8	12.5	0.05
11	5	33.02149	133.01539	4.7	13.3	16.4	7.8	0.80
12	5	33.02128	133.01524	9.7	16.0	18.6	23.5	0.50
13	5	33.02071	133.01486	7.3	16.2	17.9	32.0	0.75
14	5	33.02088	133.01460	5.5	14.7	7.8	12.8	0.05
15	5	33.02098	133.01473	5.4	18.4	21.7	10.0	0.05

帯において、測線によって D_c と H_T の平均像は異なり、それぞれ9.0～19.4 cm, 6.0～13.3 mであった。特に、Line 1は他の測線と比べて低い。平均的な κ は0.25～0.6 %程度、 D_{cn} は131～430程度であった。

図-4に調査測線樹木の D_c と形状比 H_T/D_c 、および樹冠長率の関係を示す。樹木の健全指標として、 H_T/D_c は70以下、樹冠長率は30%以上が望ましいとされている。沿岸部のLine 1, 3, 5では平均的には健全指標を満足しており、樹種のほとんどが黒松である。陸側のLine 2, 4では H_T/D_c と樹冠長率のばらつきは大きく、中には H_T/D_c が100を越えるものもあった。この測線では黒松個体比率も低く、混成林となっている。津波減勢効果について定性的な検討を加えると、Line 1, 3, 5においては中規模程度の津波に対しては、健全な H_T/D_c と樹冠長率の高さから津波減勢への寄与が期待できる一方で、巨大津波に対しては作用流体力が大きくなるため、被害リスクが増大することが考えられる。

3. 海岸樹木の引き倒し試験

(1) 引き倒し試験の方法

図-5に引き倒し試験方法の概略を示す。対象樹木は黒松とし、その胸高直径高さ（1.2 m）に樹木保護材の上からワイヤーを取り付け、重機により引張荷重を加えた。樹木と重機の間にはロードセル（東京測器研究所製TLP-100KNB、容量100 kN）を接続し、ハンドヘルドデジタルロガー（東京測器研究所製TC-32K）で荷重量の経時変化を1秒間隔で測定した。水平変位量 D_{ef} は、デジタルロガーと時刻同期を取ったビデオカメラから読み取った。写真-1に引き倒し試験の様子を示す。

図-6に水平変位量 D_{ef} と作用モーメントの関係を示す。 D_{ef} と作用モーメントの関係曲線の極大値を倒伏限界モーメント M_c とした。

図-7 D_c と M_c の関係

(2) 引き倒し試験結果

表-2に引き倒し試験を実施した樹木の諸元を示す。表中、 N_c は最大引抜荷重である。試験樹木番号1～8までは、 M_c となった時点で試験を終了し、9～15については、根返り、折損、あるいは抜根などの終局状態まで引き倒し試験を行った。図-7に D_c と M_c の関係を示す。図中、今井・鈴木（2005）のデータも併記してある。図から、ばらつきはあるものの、 D_c が大きくなるにつれて、 M_c も大きくなる傾向にあることがわかる。従来の倒伏限界モーメントの評価式は式（1）で定義される。

$$M_c = \alpha D_c^{2.0} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、式（1）中の単位については M_c : Nm, D_c : cmである。本試験のデータを用いる場合、 $\alpha=71.6$ となり、河道内樹木における倒伏限界の平均である $\alpha=78.0$ と極めて近くなる（リバーフロントセンター, 1999）。

図-7の実線は式（1）によるものを示している。試験結果と式（1）による M_c の評価値を比較すると、 $D_c < 10$ cmでは、 M_c の上限値を与え、 $D_c > 10$ cmでは M_c の下限値を与える傾向にあることがわかる。

(3) 生木の曲げ破壊強度試験

試験樹木番号11, 13, 15においては、高知県立森林技術センターにおいて3等分点4点曲げ法を用いて曲げ強度試験を行った。本稿では結果のみ記す。曲げ破壊強度は試験樹木番号順に30.6 N/mm², 21.8 N/mm², 32.4 N/mm²であった。なお、破壊形態について、曲げ破壊強度に至っても荷重点に大きな断裂はみられず、荷重一変位曲線は緩やかに下降していく傾向にあった。これらを踏まえて津波の被害リスクについて考えると、幹部で折損が生じた場合には折損部がヒンジとなって完全倒伏状態となり、主流方向の作用流体力が減少するために、残存の可能性が高くなることを示している。

図-8 β と各種群生環境パラメータの関係

4. 倒伏限界モーメント評価式の高度化

従来の倒伏限界モーメント評価式を用いる場合、 D_C でおよそその M_C の変化傾向を示すことができる一方で、そのばらつきも大きいことを示した。本研究では、 M_C に関する評価式の再定義を行った。一般的に部材の曲げ性能は、曲げ強度 σ_b と断面係数 W によって評価されるため、この関係に倣い、式(2)を定義した。

$$M_C = \beta \sigma_b W \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 β は群生環境係数、 W は D_C を用いた断面係数($=\pi D_C^3/32$)である。 σ_b については樹齢や H_T/D_C に関係すると考えられるが、本研究では曲げ破壊試験結果の平均曲げ破壊強度である28.3 N/mm²を採用した。式(2)において、 $\sigma_b W$ は樹木単体の強さと解釈することができる。

図-7中の点線は β に平均値($\beta=1.9 \pm 0.7$)を与えた場合の式(2)の評価値であり、一点鎖線はその誤差範囲を示す。(1)による評価より整合性が高くなっていることがわかる。

β を群生環境条件における変数と解釈し、 β と各種群生環境との関連について検討を行った。群生環境を代表するパラメータとして、本研究では κ 、試験樹木の D_C と試験樹木を含む林帯における D_C の平均値の比である D_{C*} 、 D_T と D_C の比である D_{r*} を選択した。いずれのパラメータも、比較的容易に調査を行うことが可能である。また、 κ は根鉢の広がりに関連すると考えられ、 D_{C*} は林帯における樹木個体間競争(日本生態学会編, 2011)の中での位置付けとなり、ある種の健全度の指標といえる。 D_{r*} は根鉢部の転倒抑制に寄与すると考えられる。なお、既報(国総研, 2013)では、群生地盤高が0.4 m以下では、水平根型に発達し、倒伏耐力が著しく低下するとの報告があるが、本試験条件ではすべて3.0 m以上であったため、地盤高に関する検討は行わなかった。

図-8に β と各種群生環境パラメータの関係を示す。図から、 $D_{C*} < 1$ の場合、 β のばらつきが大きい、 $D_{C*} > 1$ の場合では、ばらつきは小さくなり、 β は1~2の範囲とな

表-3 β と各種群生環境パラメータの偏相関係数

	β	D_{C*}	D_{r*}	κ
β	1.0	-0.29	0.21	0.27
D_{C*}	-0.29	1.0	-0.01	-0.01
D_{r*}	0.21	-0.01	1.0	-0.28
κ	0.27	-0.01	-0.28	1.0

図-9 M_C の実測値と評価値の整合性

ることがわかる。 κ については、 β との有意な相関を確認することができない。また、 D_{r*} が増加するに従い、 β も増加傾向にあることがわかる。 β と各種群生環境パラメータの単相関係数としては、明確に判断できるパラメータは D_{r*} のみであった。そのために、 β と各種群生環境パラメータの偏相関係数を求めた(表-3)。なお、今井・鈴木(2005)は D_{r*} の計測を行っていないため、一律に $D_{r*}=0$ を与えた。表から、 β への各パラメータの寄与は同程度であることがわかる。

以上から、 D_{C*} 、 κ 、 D_{r*} を説明変数とした β の構成式を本研究の条件で構築した。

$$\beta = 2.5 D_{C*}^{-0.2} \kappa^{0.4} \exp(0.04 D_{r*}) \pm 0.36 \dots\dots (3)$$

図-9に式(2)における M_C の実測値と評価値の整合性を示す。図中の一点鎖線は β を平均値で与えた場合の誤

図-10 D_C と津波流体力による倒伏モーメントの関係および D_r による M_C の変化傾向 (Line 5)

図-11 D_r と N_C の関係

差範囲, 二点鎖線は式 (3) により β を与えた場合の誤差範囲である. 図から, 式 (3) を用いた場合の M_C の評価値は, より実測値を説明し, その誤差範囲は β に平均値を採用した場合に比べて半分程度に収まっていることがわかる.

図-10に, D_C と津波流体力による倒伏モーメントの関係および D_r による M_C の変化傾向を示す. 海岸林諸元はLine 5のものをを用いている. 樹木に作用する抗力は, 樹木投影面積は今井・鈴木 (2005) の方法を用いて概算し, フLOOD数は1.0としている. 図から, Line 5においては D_r を0.9 mにすることにより, 6 mの津波浸水深 (地盤高を5m程度とすると, 津波高11 m) に対しては, 倒伏は生じ得るが流出する可能性は低く, 8 mの津波浸水深では黒松の多くが倒伏する可能性があることがわかる. また, D_r の増加は倒伏耐力の強化だけでなく N_C にも貢献する. 図-11に D_r と N_C の関係を示す. サンプル数は少ないが, 同程度の D_C の場合, D_r が厚いと N_C は大きくなる傾向にある. ただし, D_r を増加させることによる耐力強化法は黒松種に限定されることを付記しておく.

5. おわりに

本研究の結論としては, 以下が挙げられる.

- ①入野松原の林相調査を行い, 当該海岸林の林相や, 樹木の曲げ破壊試験から, 定性的な津波リスク傾向について検討した.
- ②根基部より上の砂層厚により倒伏モーメントが粘り強くなる傾向にあり, 既設の黒松海岸林における耐力強化としては, 有効な対策の一つとなる可能性がある.
- ③ D_C , κ , D_r を説明変数とした β の構成式を構築し, 倒伏モーメント評価式の高度化を行った.

謝辞: 海岸樹木の引き倒し試験を実施するにあたり, 高知県林業振興・環境部治山林道課, 同危機管理部南海地震対策課と同教育委員会文化財課, 四国森林管理局四万十森林管理署, 黒潮町役場, (独) 森林総合研究所 坂本知己氏と野口宏典氏, 高知工科大学学生諸氏に多大なるご協力を頂きました. 生木の曲げ強度試験の実施には, 高知県立森林技術センターのご協力を頂きました. ここに記して, 謝意を表します. 科学研究補助金 (研究代表者: 今井健太郎, 課題番号: 23710200), 東北大学災害科学国際研究所平成24年度特定プロジェクト研究 (研究代表者: 今井健太郎, 課題番号: 拠点研究C-2; 研究代表者: 真野明, 課題番号: 拠点研究B-2) と一般社団法人日本公園緑地協会共同研究の補助を受けました. ここに記して, 感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 今井健太郎・鈴木明葉 (2005): 沿岸樹木のパイプモデルを用いた表面積, 体積評価とその倒伏耐力, 水工学論文集, 第49巻, pp.306-310.
- 今井健太郎・松富英夫 (2008): 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.
- 今井健太郎・原田賢治・渡辺 修・江刺拓司・島貫直樹・八木智義・今村文彦 (2009): 実地形における海岸林を利用した津波減勢策-仙台湾岩沼・名取海岸を例として-, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 65, 1, pp.326-330.
- 今井健太郎・林 晃大・今村文彦 (2012): 並木の津波漂流物捕捉機能に関する基礎的検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 68, 2, pp.401-405.
- 国土技術政策総合研究所 (2013): 2011年東日本大震災に対する国土技術政策総合研究所の取り組み - 緊急対応及び復旧・復興への技術支援に関する活動記録 -, 国総研研究報告, 第52号, pp.215-220.
- 坂本知己・新山 馨・中村克典・小谷英司・平井敬三・齋藤武史・木村公樹・今 純一 (2012): 東北地方太平洋沖地震津波における海岸林の漂流物捕捉効果, 海岸林学会誌, 11 (2), pp.65-71.
- 首藤伸夫 (1985): 防潮林の津波に対する効果と限界, 海岸工学講演会論文集, 第32巻, pp.465-469.
- 日本生態学会 編 (2011): 森林生態学, 共立出版, pp.173-188.
- 原田賢治・今村文彦 (2003): 防潮林による津波減衰効果の評価と減災のための利用の可能性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.341-345.
- リバーフロントセンター 編集 (1999): 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp.156-160.