

第4節 クロマツ引き倒し試験の結果（北原 曜）

1. クロマツ引き倒し試験の必要性

海岸防災林に津波緩衝機能を発揮させる条件は、大きく三つある。一つは、各単木が津波により倒伏したり流木化しないこと、すなわち津波の流体モーメントに対して各単木の引き倒し抵抗モーメントが大きいことである。二つ目は、一定の林帯幅により林内に侵入した津波の流体力を徐々に低下させ、林帯背後にある建築物などの耐力（5 kN/m²）以下に抑えることである。三つ目は、津波が侵入しないように林帯に切れ目を作らないことである。以上の3条件のうち、一つ目の条件は津波災害を軽減させるために非常に重要な条件であり、クロマツなどの海岸防災林の引き倒し試験を行うことが必須である。

津波の単木に作用する流体力 F (kN/本) は、 U を流速 (m/s)、 H を波高 (m)、海水の単位体積重量を γ (10.1 kN/m³)、単木を胸高直径 D (m) の円柱と見なして抗力係数 $Kh=1.2$ とすると、

$$F=Kh \cdot (\gamma/g) \cdot D \cdot H \cdot U^2$$

で表される。また、単木に作用する津波の流体モーメント M (kN・m/本) は、

$$M=Kh \cdot (\gamma/g) \cdot D \cdot (H^2/2) \cdot U^2$$

で表される。

これに対し、単木の引き倒し抵抗モーメント R (kN/本) は、胸高直径 D (m) の3乗に比例すると考えられるので、以下のように表すことができる。

$$R=\alpha D^3$$

単木が倒伏しない条件は $R>M$ なので、

$$D>\sqrt{Kh \cdot (\gamma/2\alpha g) \cdot H \cdot U} \quad \dots (1)$$

で表される。すなわち、 $Kh=1.2$ 、 $\gamma=10.1$ kN/m³、 α = 樹種により異なる係数、 $g=9.8$ m/sec² として数値を与えれば、倒伏しない D (m) を求めることができる。なお、 D は津波の波高と流速に比例して大きくする必要があることが分かる。

ところで、立木の引き倒し試験は、土石流緩衝林として信州大学農学部治山学研究室などを中心に主要造林樹種と溪畔林などを対象に最近多数行われてきているが、海岸防災林を対象に引き倒し試験が行われたことはこれまでになく、砂質土に成育するクロマツなど海岸防災林樹種の引き倒し抵抗モーメントは全く知られていない。土石流緩衝機能と津波緩衝機能は、メカニズムは全く同じで、違いは唯一、立木に作用する土石流と津波の流体力の差であり、この差

を決定するのは単位体積重量でしかない。したがって、土石流緩衝機能解明のための立木引き倒し試験は、対象樹種を変えるだけで、試験方法は全く同じである。

信州大学農学部治山学研究室は、立木引き倒し試験の機器やワイヤー類、ノウハウや習熟した学生スタッフなどが揃っており、海岸防災林の引き倒し試験の条件は整っている。ただし、長野県には海岸防災林がないので、臨海県であり東海地震対応のため海岸防災林を造成保全している愛知県に打診したところ、快く海岸防災林の引き倒し試験に協力していただけることとなった。場所は渥美半島田原市の伊良湖岬周辺である。以下、2011年9月にこの場所でクロマツを対象とした引き倒し試験を行った結果について報告する。

2. クロマツ引き倒し試験の対象地と方法

クロマツ引き倒し試験は以下の要領で行った。

実施日時：2011年9月14日

実施場所：愛知県田原市愛知県栽培漁業センター内の52年生クロマツ人工林

実施主体：信州大学農学部森林科学科治山学研究室

協力：愛知県農林水産部森林保全課治山G

同 東三河農林水産事務所林務課

(財) 愛知県水産業振興基金栽培漁業部

事前に、表1のような毎木調査により林相等の把握をし、また様々な胸高直径の単木を引き倒せるよう、引き倒し対象木候補を選別しておいた。ただし、このクロマツ林はマツノザイセンチュウによる枯損が激しく、大径木から枯損し既に伐採処理が進んでいる。したがって、事前調査で引き倒し候補木を決めてあっても、枯損したり衰弱した木が含まれている。クロマツは林齢52年で、林床はシャリンバイやウバメガシ、クスノキなどが侵入している。

このクロマツ林の標高は2.0mで、地形は平坦である。土壌は円礫混じりの砂質土であり、愛知県東三河農林水産事務所林務課の調査によると地下水位は1.5m付近に存在し変動は少ない。実際に引き倒し試験前日に1.0m掘削しても地下水位は確認できなかった。最寄りの田原アメダス観測点によると、年平均気温は16.0度、年平均降水量は1602mmである。

表1. 毎木調査の結果

プロット No.	プロット面 積	クロマツ生 立木本数	クロマツ伐 根数	広葉樹立木 本数	全立木密度 (本/ha)	伐根を除く本数 密度(本/ha)
A	10×10m	18	7	30	5500	4800
B	10×10m	6	8	22	3600	2800
C	10×10m	7	8	20	3500	2700
D	10×10m	10	8	12	3000	2200
平均					3900	3125

対象木は、事前に胸高直径、樹高、枝下高、東西南北4方向の枝張りを測定した。引き倒しは、以下の手順で行った。

(1) 対象木の地際から1.0mの高さの幹にワイヤーをかける。

(2) ただし、対象木を引き倒す際、木に傷がいたりワイヤーが皮ズレしたりするのを防ぐため、対象木とワイヤーの間にゴムタイヤを挟んだ。

(3) 対象木に巻いたワイヤーと重機に結んだワイヤーとの間にロードセル(東京測器研究所製, TLP-100KNB)を挟み、ロードセルからの電気信号をインターフェイス(DBU-120A)を介してパソコンに時系列でデータ収録した。インターバルは0.1秒とした。重機は、ZAXIS 225USを用いた。

(4) 重機による牽引は、徐々に負荷をかけ、引き倒し抵抗力が最大を過ぎ、今度は抵抗力が低下してきたら引っ張り荷重を除荷した。最大引き倒し抵抗力は、立木が約10~20度程度傾いた時に発生し、それ以上引っ張り荷重を加えても抵抗力は減少していくため、抵抗力が減少に転じた時に負荷を中止した。

(5) 得られた最大引き倒し抵抗力に、地際からの高さ1mを乗じて、最大引き倒し抵抗モーメントを得た。

3. 試験結果と考察

クロマツ引き倒し試験の対象木の形状と引き倒し結果を述べる。引き倒し試験を行った対象木は、胸高直径が15~29cmの立木とした。これ以上の立木も引き倒したが、マツ枯れの影響が見られ、胸高直径の割には大変低い引き倒し抵抗力であったので、除外した。なお、これまでの造林樹種や溪畔樹種を対象に行ってきた引き倒し試験では、胸高直径が10cm以下の立木は引き倒し荷重を与えるとワイヤーがずれてしまい、皮ズレが生じて正確な引き倒し抵抗力が記録されないことが分かっている。そのため、胸高直径は15cm以上とした。

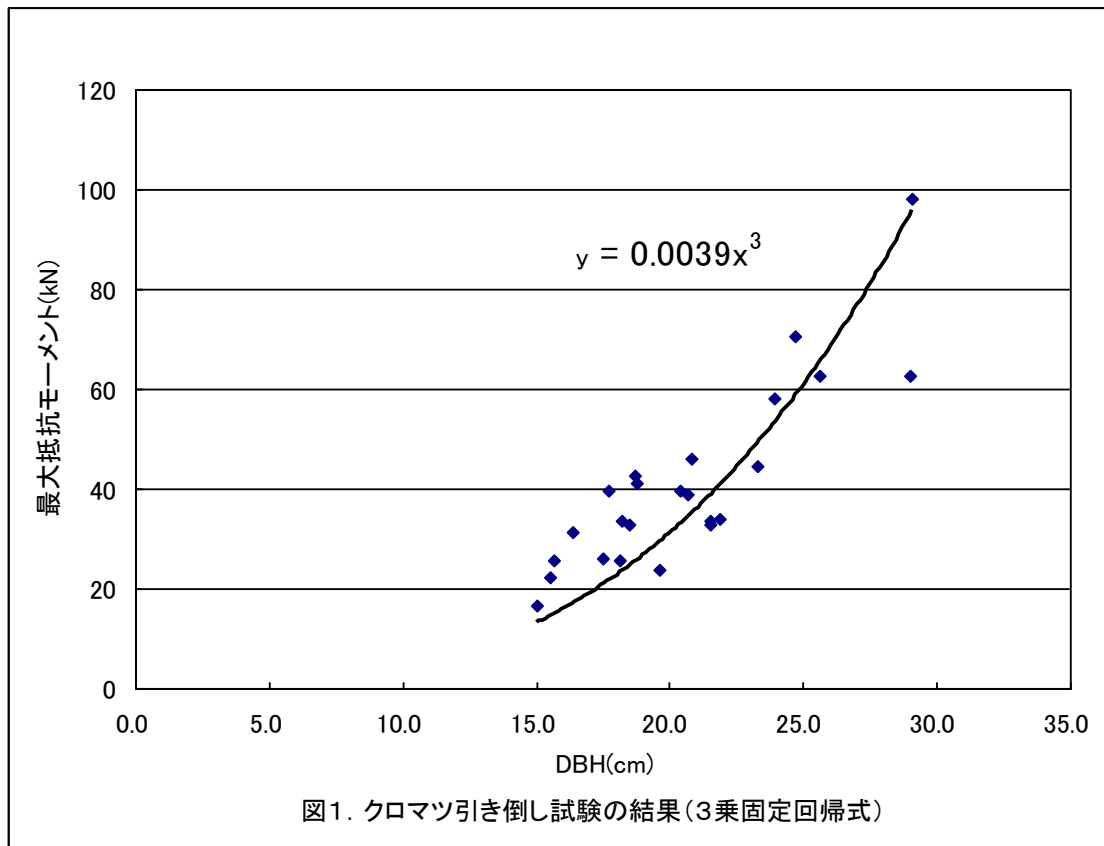
引き倒し時の状況を概略すると、幹折れが3本、根返りが4本あった。これまでの樹種では、通常、根返りは多く認められるものの幹折れはなかったので、幹折れはクロマツに多い特徴ではないかと思われる。おそらく、地下水位が深い所にあるクロマツでは、根系が発達している一方、幹は針葉樹であるため柔らかいため、引き倒し荷重がかかると幹折れが生じやすいものと推察される。

引き倒し試験の結果を図1に示す。これまでの多数の引き倒し試験から、べき値は3乗に固定してある。なお、株立ちのものは、各胸高直径から胸高断面積合計を算出し、これを1本の立木として仮想的な胸高直径を求めた。図示のように、比較的よい回帰式が得られ、クロマツの係数は0.00390であった。これまでに得られた樹種の係数を大きい順に並べると、コナラ0.00679、ヒノキ0.00437、カラマツ0.00223~0.00387、スギ0.00282、カツラ0.00214、サワグルミ0.00199、トチノキ0.00180、オノエヤナギ0.00113であるので、クロマツはコナラやヒノキよりやや低いものの、比較的引き倒し抵抗モーメントが大きい樹種であると考えられる。なお、秋田県ではクロマツを対象に同様の試験を行い、以下の式が得られている。

$$y=0.0064x^{2.795}$$

ここで、 y は引き倒し抵抗モーメント(kN・m/本)、 x は胸高直径(cm)。この回帰式から胸高

直径 25cm の引き倒し抵抗モーメントを算出すると 52kN・m であり，愛知県で得られた式から算出した値 61kN・m と比較的近似していた。



以上の成果をもとにクロマツ単木が倒伏せず津波緩衝機能が発揮される胸高直径 (m) は，(1) 式に示されたように (再掲)，

$$D > \sqrt{Kh \cdot (\gamma / 2\alpha g) \cdot H \cdot U} \quad \dots (1)$$

で表され，これに $Kh=1.2$ ， $\gamma=10.1 \text{ kN/m}^3$ ，胸高直径の単位を cm から m に換算して $\alpha=3.90 \times 10^3$ ， $g=9.8 \text{ m/sec}^2$ を代入すると，

$$D > 0.0126 \cdot H \cdot U \quad \dots (2)$$

となる。この (2) 式に津波の波高 $H=5 \text{ m}$ ，流速 $U=5 \text{ m/sec}$ を与えると，胸高直径は 32cm 以上必要となる。波高が 10m となるとこの 2 倍の太さ，また流速が 2 倍になるとやはり 2 倍の太さが必要となる。このように津波の波高や流速が大きくなるに従い，必要な胸高直径を非現実的な値としなければならなくなる。したがって，クロマツに津波緩衝機能を期待するならば，波高 5 m，流速 5 m/sec 以下の津波までとするべきであろう。これ以上の巨大津波に対しては，土盛りするなどの土木的対策が必要となる。なお，津波来襲時を考えると，土壌は飽和条件になると予想されるが，飽和条件下と不飽和条件下で引き倒し抵抗モーメントに差がないことが分かっているので，(2) 式は津波来襲時にも有効と考えられる。

なお，もともと地下水位の高い場所，例えば仙台市荒浜地区の貞山堀の内陸側などでは，根

系が極めて浅くしか分布していないため、引き倒し抵抗力が極めて弱いと考えられる。このようなクロマツの引き倒し試験が必要であるとともに、地下水位の高い立地条件下でもやはり土盛りが必要と考えられる。

