



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ニセアカシア街路樹の耐風性
Author(s)	小泉, 章夫; 平井, 卓郎; 笠, 康三郎 他
Citation	北海道大学演習林研究報告, 64(2), 105-112
Issue Date	2007-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/30300
Type	departmental bulletin paper
File Information	64(2)_105-112.pdf



ニセアカシア街路樹の耐風性

小泉 章夫¹ 平井 卓郎¹ 笠 康三郎²
中原 亮³ 新谷 克教⁴ 清水 英征⁵

Wind Damage Resistance of *Robinia pseudoacacia* Planted on the Roadsides

by

Akio KOIZUMI¹, Takuro HIRAI¹, Kouzaburo RYU²,
Ryo NAKAHARA³, Katsunori ARAYA⁴, Hideyuki SHIMIZU⁵

要 旨

街路樹としてのニセアカシアの耐風性を評価することを目的として研究を行った。札幌駅前通りのニセアカシア街路樹6本を供試木とし、うち3本の引き倒し試験を行った。試験後、全供試木を伐採して生材状態で無欠点小試験体の曲げ破壊試験とせん断試験を行った。引き倒し試験の結果、ニセアカシアの根返り耐力は十分に大きいことがわかった。同時に木材の曲げ強さも大きかったため、腐朽などが無い場合、暴風時の破壊形態は主に根返りとなることが予測された。樹冠を剪定し樹高を10m程度に抑えることができれば、供試木が保有していた根返り耐力で風速30mの暴風に抵抗できると予測された。ただし、植栽してから根鉢が形成されるまでの期間は支柱で補強する必要があると考えられた。地上支柱で支える場合、支点で樹木を拘束することより樹皮の傷害を避けることに重点を置くことが必要と考えられた。

キーワード：*Robinia pseudoacacia*, 風害, 街路樹, 引き倒し試験, 根返り

2007年2月28日受付, Received February 28, 2007

2007年7月2日受理, Accepted July 2, 2007

1: 北海道大学大学院農学研究院木材工学研究室 (060-8589 札幌市北区北9条西9丁目)

Laboratory of Timber Engineering, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, 060-8589 Japan

2: 有緑花計画 (064-0822 札幌市中央区北2条西25丁目1-10)

Greenery and Flowering Consultants Co., Ltd., Sapporo, 064-0822 Japan

3: 雪印種苗株環境緑化本部 (004-8531 札幌市厚別区上野幌1条5丁目1-8)

Environmental Enhancement and Landscaping Division, Snow Brand Seed Co., Ltd., Sapporo, 004-8531 Japan

4: 札幌市環境局みどりの推進課 (060-0051 札幌市中央区南1条東1丁目)

Greenery Promotion Department, Environmental Affairs Bureau, Sapporo City, Sapporo, 060-0051 Japan

5: 札幌市建設局創成・駅前整備担当課 (060-8611 札幌市中央区北1条西2丁目)

Public Works Department, Construction Bureau, Sapporo City, Sapporo, 060-8611 Japan

1. はじめに

地球温暖化の影響で台風の勢力が強まるといった傾向が予測されている中で、近年では2002年の21号台風、2004年の18号台風、23号台風によって多くの造林木や緑化木に風倒害が発生している。樹木の風害防除の対策を考える上で、歩行者や通行車両への危険回避という点では、山林の林木より都市の街路樹や公園樹で耐風性診断の必要性が高まっているとも言えよう。

樹木の耐風性を評価するうえで、樹冠の風圧力の受けやすさ、幹折れ耐力を左右する心材腐朽を含めた樹幹の曲げ強さ、根返り耐力を決定する根系のモーメント抵抗などが重要な因子となる。これらのうち、風圧力評価に欠かせない樹冠の抗力係数と根返り耐力については、供試材料の入手も含めて実験が困難で、基礎的データが決定的に不足している現状である。

2006年10月に札幌駅前通りの整備事業にともなって歩道の街路樹を撤去するにあたって、ニセアカシアの引き倒し試験を行う機会を得た。本研究では街路樹としてのニセアカシアの耐風性を評価することを目的に、実験結果から幹折れや根返りを引き起こす限界風速を推定した。また、植栽直後のニセアカシアの根返りを支柱によって防止する補強について考察した。

2. 材料と試験方法

2. 1 供試木

札幌駅前通り（札幌市中央区北1条～北3条、西3～4丁目間の南北方向の道路）歩道上のニセアカシアのうち胸高直径30cm前後のもの5本と15cmのもの1本の計6本を供試木とした（Table 1, Fig. 1）。これらの供試木は歩道の車道側に設けられた123×250cmの植栽ますの中に1本ずつ植栽されていた。一部の樹木は支柱で保持され、植栽ますの内側を鋳鉄

製の保護蓋で覆われていた（Fig. 2）。供試木のうち、No. 1, 3, 5の3本を引き倒し試験用として、樹高（ H ）と胸高直径（ D_B ）のほか、地際周囲長、樹冠高さ（樹冠下端までの高さ、 H_C ）、および樹冠幅（ B_C ）を測定した。Table 1に示した樹齢は引き倒し試験後に採取した伐根の年輪数、また樹幹径（ D_B , D_0 ）は周囲長からの換算値である。



Fig. 1. Typical tree form (tree number 5).



Fig. 2. Sample tree (No. 3) planted with support posts.

Table 1. Ages and dimensions of the sample trees.

No.	Age	H (m)	H_C (m)	B_C (m)	D_B (cm)	D_0 (cm)
1	29	11.0	4.4	4.1	31.8	37.3
2	38	11.0			29.0	
3	27	9.0	3.5	4.4	15.0	31.7
4	40	14.0			28.0	
5	19	12.0	4.0	5.8	28.6	42.7
6	24	15.0			31.8	

H : Tree height, H_C : Crown height, B_C : Crown breadth, D_B : Diameter at breast height, D_0 : Diameter at tree base

2. 2 引き倒し試験

3本の供試木の樹幹に巻いた荷役用スリングに連結したワイヤーを手動ウィンチ（能力30kN）で巻き上げ、最大荷重を超えて根上りが生じるまで引張負荷を行なった（Fig. 3）。供試木の加力点高さ（ H_L ）は2～3mとし、支点は引き倒し供試木から7～8m離れた位置にある隣接供試木の根元にとった。荷重はスリングとワイヤーの間に連結したロードセル（50kN容量）で検出した。樹幹の傾きは地上高1m付近の水平変位を巻き取り式変位計（共和電業製、DTP-D-500S）で測定し、根元からの傾斜角（ θ_S ）に換算した。ここで、樹幹の回転中心は地際にあるものと仮定した。また、樹幹の曲げ変形成分は無視した。荷重と変位は約1秒間隔でデータロガー（東京測器製、TC-31K）に記録した。

最大荷重時の根元モーメント（ M_{R-max} ）は以下の式から算出した。ここで、樹幹の傾斜に伴って重心が移動することによる付加モーメントの影響は無視した。

$$M_{R-max} = P_{max} \cos \theta_L H_L \quad (1)$$

ここで、 P_{max} 、 θ_L 、 H_L は、それぞれ、最大荷重、引張角度と加力点高さ（Fig. 3参照）。

2. 3 木材の強度試験

No. 3を除く5本の供試木について、引き倒し試験後に地上高60～250cmの部位で玉切りした丸太をだら挽き製材した。これらの製材のうち、髓を含む柢目板各1枚の地上高60～100cmの部位の樹皮側より20×20mm²断面の無欠点小試験体を5～8体ずつ、合計29体を製作した。

これらの試験体は生材状態でJIS-Z2101にしたがって、曲げ破壊試験、およびせん断試験に供した。

2. 4 風圧モーメントの評価

風を受ける樹木の根元モーメント（ M_R ）は、枝下部の樹幹に作用する風圧力を考慮しない場合、樹冠に作用する風圧力（Mayhead 1973）と風圧中心から根元までのモーメント長さ（風心高、 H_W ）の積として(2)式で表すことができる。

$$M_R = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A_C H_W \quad (2)$$

ここで、 C_D ：樹冠の抗力係数、 ρ ：空気密度（1.20kg/m³）、 v ：風速、 $A_C = \pi B_c (H - H_c)/4$ 。

ニセアカシア樹冠の抗力係数（ C_D ）は針葉樹6樹種の実大樹木の風洞実験からMayhead（1973）が見積もった値を参考にして0.2～0.3の範囲とした。こ

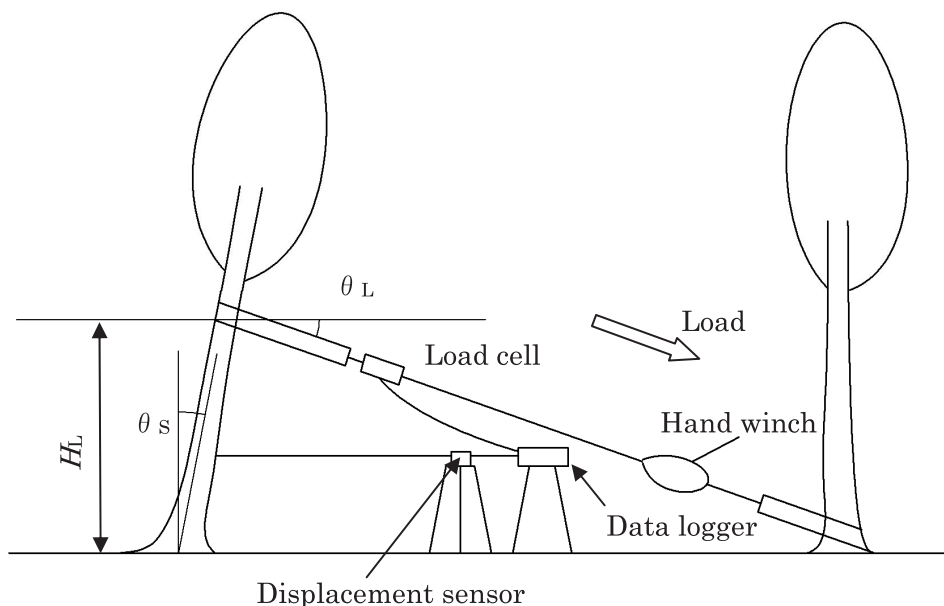


Fig. 3. Schematic diagram of pull-down test.

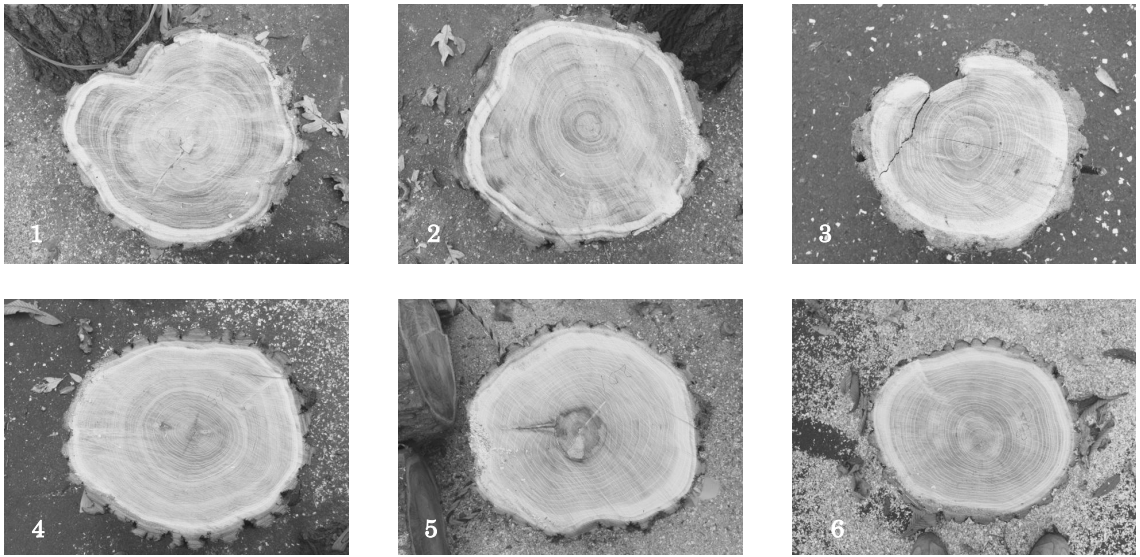


Fig. 4. Cross sections for sample trees at 60-cm-height.

これらの値は Mayhead が解析対象とした 6 樹種の中で抗力係数の小さかった 2 樹種の風速 30m/s 時の推定値（ベイツガ：0.2，ペイマツ：0.3）である。モミやトウヒのような樹冠の枝葉密度の高い樹種では 0.5 程度の値が測定されているが，ニセアカシアのような広葉樹ではそれより小さい（樹冠の風の透過率が高い）ものと考えた。

樹冠面積（ A_C ）は樹冠形状を楕円と仮定したときの南北方向（加力方向）の水平投影面積とし，風心高（ H_W ）は樹冠楕円の中心高さとした。

3. 結果と考察

3. 1 供試木の傷害と腐朽の状況

No. 3 は成長が不良で，地際から胸高位付近にかけて北側（引き倒し試験において加力の反対側）の樹皮の一部が脱落し，木部が露出した状態であった。ただし，露出した材面からの腐朽は明らかではなかった（Fig. 4）。それ以外の 5 本の胸高直径と樹高に大差はないが，試験後に伐根で数えた年輪数による樹齢は 19～40 年のばらつきがあった（Table 1）。

地上高 60cm の樹幹断面において心材腐朽は No. 5 の髄付近にしか観察されなかった（Fig. 4）。No. 5 は 19 年生で髄から数年輪目に樹皮の脱落痕とそれに続く巻き込み跡，および周辺への接線方向の割れが観察され，植栽後の早い段階で樹皮に傷害を受けたことが腐朽の原因になったものと推察された。

3. 2 根返り耐力と限界風速

引き倒し試験による供試木の破壊形態は No. 1 および 5 が根返りで破壊した。No. 3 は根元付近の樹幹が割裂破壊したため，根返り耐力の評価はできなかった。この供試木では木部の肥大成長が樹皮の部分的な枯死によって不整になったことが樹幹の割裂を引き起こした原因と推定された（Fig. 4 参照）。

Fig. 5 に各供試木の根元モーメント（ M_R ）と樹幹の傾斜角（ θ_S ）の関係を示した。根返りした 2 本の供試木はモーメント—傾斜角関係が直線域（弾性域）を超えてから，断続的に根の破断音が聞こえ，引張側の水平根の破断によって植栽ます内の加力と反対側の地面に割れが入るころに最大荷重を記録し，その

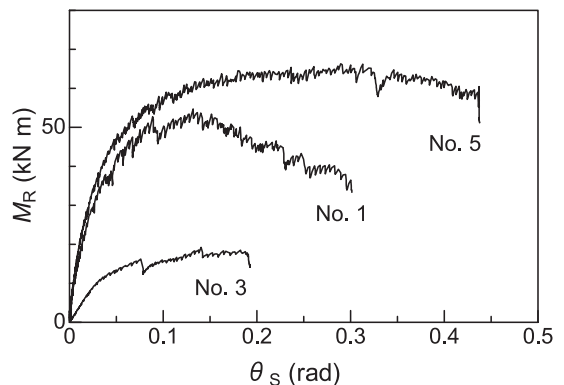


Fig. 5. Moment-stem angle relationships for the sample trees.

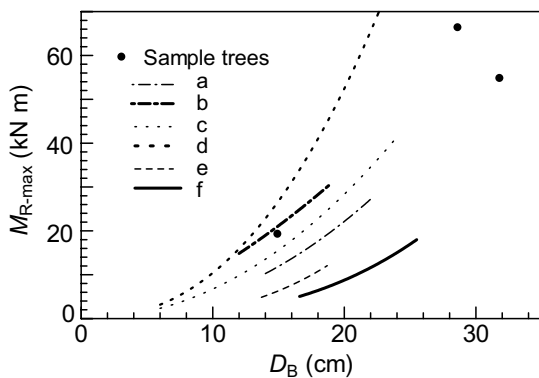


Fig. 6. Maximum moment as a function of breast height diameter.

a: Conifers (Tamate et al. 1965), b: Broad leaved trees (Tamate et al. 1965), c: Conifers (Kamata 1956), d: Broad leaved trees (Kamata 1956), e: Conifers (Koizumi et al. 1985), f: Apple trees (Koizumi et al. 2007)

後も粘り強い挙動を示した。

Fig. 6 に既往の引き倒し試験結果に当てはめた胸高直径による、べき乗回帰曲線と今回の試験結果を重ねて示した。既往の実験結果は胸高直径 6～24cm の山林（新潟県）のナラ、ブナ、スギに関する実験（鎌田 1956）、胸高直径 12～22cm の山林（八王子市）のアラカシ、クリ、ケヤキ、スギ、ヒノキに関する実験（玉手ら 1965）、苫小牧の火山礫土でのエゾマツ、アカエゾマツ、トドマツ、カラマツ（胸高直径 13～19cm）の実験（小泉ら 1985）、および果樹園（余市町）のリング樹（胸高直径 17～27cm）に関する実験（Koizumi et al. 2007）である。

供試木のニセアカシアは植栽ますに根張りの伸長を制約された劣悪な環境であったにも拘らず、根返りで破壊した供試木の最大モーメントは 50kNm を超え、山林のアラカシ、クリ、ケヤキに匹敵する根返り耐力を示した。このように根返り耐力が大きかったのは、20～30年生で胸高直径 30cm に達する旺盛な肥大成長が示す樹勢が影響していたためかもしれない。樹齢がたとえば 40 年を超えて樹勢が落ちたときの耐力は不明であるが、植栽後の比較的早い段階から街路樹として十分な根返り耐力を発揮できることが示唆された。

供試木 3 本について、(2)式を変形して得られる(3)式に、樹木形状の

Table 2. Estimated critical wind velocity concerning uprooting (v_U) for the sample trees

No.	M_{R-max} (kNm)	$v_{U0.3}^{*1}$ (m/s)	$v_{U0.2}^{*2}$ (m/s)
1	54.7	42.9	52.6
3	19.2	30.0	36.7
5	66.3	35.5	43.5

M_{max} : Maximum moment at tree base, $*1$ Assuming C_D as 0.3, $*2$ Assuming C_D as 0.2

数値（Table 1）と引き倒し試験で求めた最大モーメント（ M_{R-max} ）を代入して、根返りを引き起こす限界風速（ v_U ）を算出した（Table 2）。No. 3 は根返りではなかったが、根元で破壊したので同様に扱った。

$$v_U = 4 \sqrt{\frac{M_{R-max}}{C_D \rho \pi B_C (H + H_C) (H - H_C)}} \quad (3)$$

限界風速は、No. 1 で 43～53m/s、No. 3 で 30～37m/s、No. 5 で 36～44m/s と計算された。限界風速は静荷重条件の引き倒し試験から求めているので、この範囲の風速が数秒間程度続けば樹木は倒壊の危険があると考えることができる。風速の観測値と比較するなら、最大瞬間風速が限界風速を超え、最大風速（10 分平均風速の最大値）が限界風速に近づくと根返りのおそれがあるといえる。

3. 3 ニセアカシア材の強度と幹折れ限界風速

伐採した丸太から製作した無欠点小試験体の生材時の強度の供試木平均値は Table 3 に示すように、供試木間でややばらつきがみられたが、全平均値は曲

Table 3. Mechanical properties for the small clear specimens in raw condition (average for each tree).

No.	Number of specimens	ARW (mm)	Specific gravity	MOE (GPa)	MOR (MPa)	SS (MPa)
1	6	3.9	0.738	7.8	64.3	9.6
2	5	5.7	0.664	6.9	59.0	10.2
4	5	2.9	0.748	10.7	100.4	9.4
5	8	7.2	0.726	5.8	54.4	10.7
6	5	6.5	0.728	8.9	66.9	10.1
Average		5.4	0.722	7.8	67.3	10.1
CV (%)		34.3	4.6	23.3	26.4	5.0

ARW: Average ring width, MOE: Modulus of elasticity, MOR: Modulus of rupture, SS: Shear strength

げ強さとせん断強さでそれぞれ67MPa および10MPa であった。

曲げ破壊の性状は Fig. 7 に供試木 No. 1 の6体について示したように、最大荷重に達した後も脆性的に破断することなく、非常に粘り強い性状を示した。

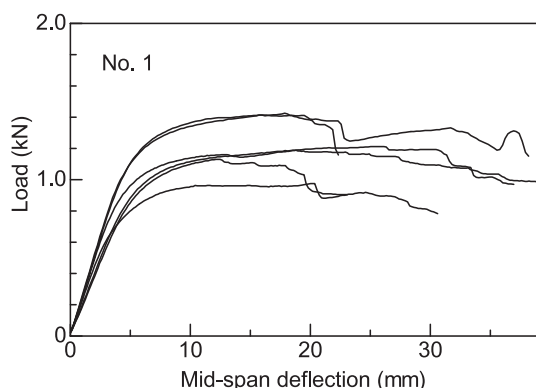


Fig. 7. Load-deflection curves in bending test for the specimens of tree number 1.

樹木の幹折れは樹幹の最大曲げ応力が曲げ強さに達したときに生じる。樹幹の曲げモーメントは地際で最大となるが、樹幹の細りがあるので、曲げ応力は地際より高い位置で最大となることが多い。ここで樹幹の細り形状を直線テーパと仮定すると、Fig. 8 に No. 1 に関する計算例を示したように、最大曲げ応力は風心高の樹幹径 (D_W) の1.5倍の樹幹径の高さで最大値をとる (小泉 1987)。各供試木について、地上高60cmと250cmで測定した周囲長から決定した樹幹直径の細り率 (β) を用いて(4)式によって最大曲げ

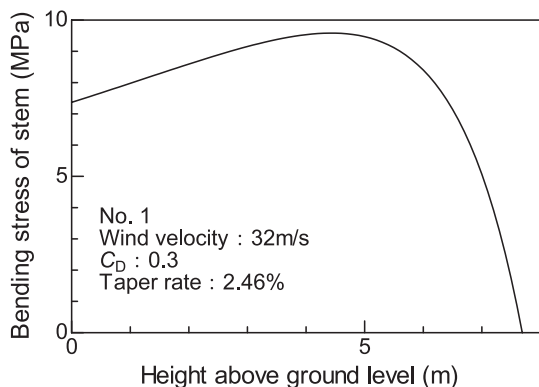


Fig. 8. Estimated stress distribution for the stem of tree number 1.

応力が生じる高さ (H_B) を決定した。

$$H_B = H_W - \frac{D_W}{2\beta} \quad (4)$$

樹幹断面を真円と仮定すると、 H_B の高さで樹幹の曲げ破壊を引き起こすモーメント ($M_{B-\max}$) は(5)式で表される。

$$M_{B-\max} = \frac{1}{32} \pi (1.5D_W)^3 MOR \quad (5)$$

ここで、 MOR : 樹幹木部の曲げ強さ。

(2)式右辺のモーメント長さの項を $H_W - H_B$ として(2)式を H_B におけるモーメントの式に変え、左辺に(5)式を代入すると、(6)式のように H_B で幹折れを生じる限界風速 (v_B) を算出できる。ここで MOR は測定した生材曲げ強さの平均値: 67MPa を用いた。

$$\begin{aligned} v_B &= \frac{3}{4} \sqrt{\frac{3D_W^3 MOR}{2C_D \rho B_C (H_W - H_B) (H - H_C)}} \\ &= \frac{3}{4} \sqrt{\frac{3\beta D_W^2 MOR}{C_D \rho B_C (H - H_C)}} \end{aligned} \quad (6)$$

Table 4 に示したように限界風速は34~103m/sと計算され、No. 3を除いて根返りに関する限界風速を大きく上回った。これらの試験結果より、ニセアカシアの曲げ強度は非常に大きく、腐朽などによる木部の損傷がなければ、風害による破壊形態は根返りが中心となることが予想される。

Table 4. Estimated critical wind velocity concerning windbreak (v_B) for the sample trees.

No.	Taper rate (%)	H_C (m)	$v_{B0.3}^{*1}$ (m/s)	$v_{B0.2}^{*2}$ (m/s)
1	2.46	4.5	84.4	103.4
3	1.36	3.3	34.0	41.6
5	2.70	6.1	44.0	53.8

H_C : Estimated critical height as for windbreak, *1 : Assuming C_D as 0.3, *2 : Assuming C_D as 0.2

3. 4 支柱による根元モーメントの低減効果

植栽後の樹木は、根が活着して根鉢が形成されるまでの数年間、根返りを防止するために、支柱による補強が必要と思われる。従来から街路樹によく用いられる鳥居型の地上支柱は剛性が小さく、風圧力を受ける樹木を完全に固定することはできない。風圧力によって樹木の結束位置 (支点) が動くことも予想される。このような低剛性の支柱がどの程度の根元モーメント

の低減効果を持っているかは明らかではない。そこで、地上支柱の支点保持剛性が根元モーメントの減少にどの程度寄与しているかについて試算を行なった。

風心高 (H_W) に風圧力 (P_W) を受ける樹木を H_S の高さで支持した場合、樹幹の曲げモーメント分布は Fig. 9 のようになる。ここで、根元を剛節、根元から支持点までの樹幹の曲げ剛性を一定と仮定すると、風圧力に対する支持点の反力 (P_S)、風圧力による根元モーメント (M_W)、支持点反力による根元モーメント (M_S)、および両者を合わせた根元モーメント (M_R) はそれぞれ、以下の式で計算できる。ここで、 P_S は支持点が移動しない場合の計算値とし、 M_R は風圧力によるものを正值にとった。

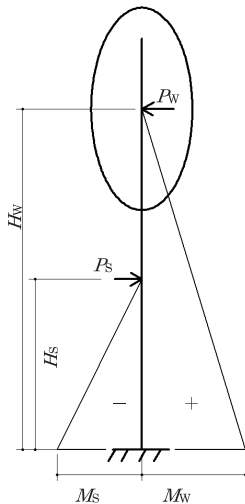


Fig. 9. Bending moment diagram for a stem supported at the height of H_S .

$$P_S = \frac{(3H_W - H_S)}{2H_S} P_W \quad (7)$$

$$M_W = P_W H_W \quad (8)$$

$$M_S = -P_S H_S \quad (9)$$

$$M_R = M_W + M_S \quad (10)$$

(7式から、支持点の移動を許さずに支持した場合の反力 (P_S) は、支持点高さが風心高と一致する場合に P_W と等しく、風心高から下がるにつれて P_W より大きくなり、支持点を根元近傍にした場合は非常に大きくなるのがわかる。先に述べたように、通常、支柱はこの反力を支えることができず、支持点は Fig. 9 において左方向に移動し、それに比例して反

力も小さくなる。

支持点の移動を許さずに支持したときの反力に対する実際の反力の比を支柱の剛性率と定義して、剛性率と根元モーメント (M_R) の関係を示したのが Fig. 10 である。ここで M_R は支柱がない場合 ($P_S=0$) を 1 として表した。Fig. 10 の各直線は支持点高さに対する風心高の比を 2.0~5.0 の 4 段階で変化させた結果を示したもののだが、根元モーメント比に大差はないことがわかる。たとえば、樹高 5 m 程度の樹木を植栽して高さ 1 m 程度で支持する場合は、この範囲に入る。

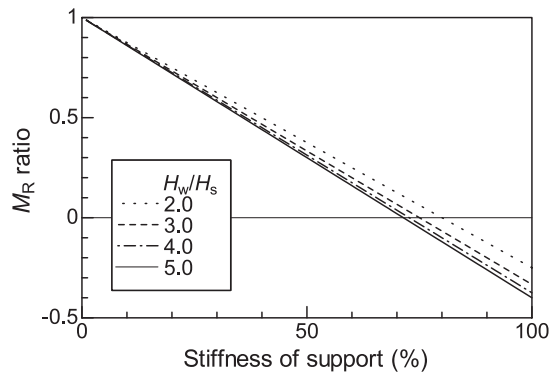


Fig. 10. Calculated bending moment at tree base as functions of support stiffness and support height.

Fig. 10 から、支柱の剛性率が 100% に近い場合、 $|M_S| > |M_W|$ となって、根元では負のモーメントになることがわかる。また、支柱の剛性率が 30% 程度以上あれば、すなわち、樹木の支持点高さにおける自由なたわみを支柱によって 30% 以上拘束できれば、根元モーメントの大きさは 50% 以下に減少できることが予測される。したがって、地上部で樹幹を支える支柱の場合、樹幹の固定はそれほど強固でなくてもよいと考えられる。

4. 結 論

- (1) 街路樹の引倒し試験の結果、ニセアカシアの根返り耐力は山林の広葉樹に匹敵するほど大きいことがわかった。同時に木材の曲げ強さも大きいことから、腐朽などが無い場合、風害の形態は根返りを中心としたものになることが予測された。
- (2) 根返りを引き起こす根元モーメントは樹高と樹冠面積に比例して大きくなる。樹木の成長にともなって根系が発達することによるモーメント耐力の増加

影響は不明だが、剪定などによって樹冠長さと樹冠幅を抑え、樹高を10m程度に抑えられれば、今回の供試木が保有していた耐力で風速30m/sの暴風に抵抗できると考えられる。

- (3) 植栽後、根鉢が形成されるまでの数年間、地下部あるいは地上部を支柱などで補強する必要があるだろう。地上支柱で支える場合、支持点における樹幹の固定はそれほど重要ではないことが計算の結果示された。若齢木では樹皮の傷害を避けて、適切な剪定を行うことが腐朽を防止する上で重要と考えられる。そのために樹皮の支柱への結束方法には十分留意する必要がある。

引用文献

- 鎌田正之 (1956) なだれに対する林木と杭の強度について, 雪氷, 21: 182-185.
- 小泉章夫, 近岡大志, 上田恒司 (1985) 造林木の根系の支持力試験, 日本木材学会北海道支部講演集, 17: 17-20.
- 小泉章夫 (1987) 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究, 北大演習林研報, 44: 1329-1415.
- Koizumi, A., Araki, H., Hori, H., Inagawa, Y. (2007) Windthrow resistance of apple trees grafted in an orchard. J. Wood Science DOI: 10.1007/s10086-007-0907-7.
- Mayhead, G.J. (1973) Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. Agricultural Meteorology, 12: 123-130.
- 玉手三稔寿, 檜山徳治, 笹沼たつ, 高橋亀久松 (1965) 立木引き倒し試験, 日本林学会誌, 47: 210-213.

Summary

We evaluated the wind damage resistance of six *Robinia pseudoacacia* trees planted on the roadsides of Sapporo city. Pull-down tests were conducted to measure the uprooting strength. After these tests, the strength properties of small clear specimens sampled from the felled trees were measured while they were green to evaluate the windbreak possibility of the stems.

The uprooting strength of the *Robinia* trees was found to be as large as that of broadleaved trees grown in forests reported in previous studies. The bending strength of the small clear specimens was 67 MPa in average. Comparing the critical wind velocities estimated for both uprooting and stem breakage, the failure mode of wind damage was considered to be uprooting for the sample trees. The estimated critical wind velocities of the sample trees with respect to uprooting failure were 30 to 57 m/s, assuming that the drag coefficient of the tree crown ranged from 0.2 to 0.3. *Robinia* trees planted on the roadsides are considered to have sufficient resistance against stormy winds when their height is maintained at less than 10 m by appropriate pruning.

Newly planted trees should be supported until a root-soil plate is formed. Simple calculations with respect to the moment distribution for a cantilever beam with a support revealed that a rigid fixation is not required to reduce the moment at tree base. To avoid injury to the bark, it is important to appropriately consider the supporting and pruning treatments.

Keywords: *Robinia pseudoacacia*, wind damage, roadside tree, pull-down test, uprooting