移植高木の引き倒し試験による耐風性の評価

EVALUATION ON THE WIND RESISTANCE OF TRANSPLANTED TALL TREES

橘 大介 — * 1 直木 哲 — * 2
今井一隆 — * 3

Daisuke TACHIBANA — * 1 Satoshi NAOKI — * 2
Kazutaka IMAI — * 3

キーワード：
耐風性, 高木, 移植, 引き倒し試験, 樹木用支柱

Keywords:
Resistance to wind damage, Tall tree, Transplant, Pull-down loading test, Supports for trees

Tall trees with their heights of more than ten meters are transplanted quite often as landscaping planting in Japan recently. These transplanted tall trees tend to fall down because of the moments induced by strong wind forces. The objective of this study is to clarify the resistance to wind damage of transplanted tall trees. Three kinds of trees and thirty two specimens were used for pull-down loading tests in the field. We obtained important results and information such as the effects of various factors on a maximum pull-down moment, the improvement effects of a support system for a tree on the resistance to wind damage, the wind velocity when a tree falls down, and a tilt angle of a tree and restoration characteristics to its original state after suffering wind pressure.

1. はじめに

一般に街路樹や外構植栽は、都市における景観向上、環境保全、防災などの重要な役割をかなり以前より果たしてきた¹⁾。とりわけ高木を植栽することは、近年問題になっている地球温暖化やヒートアイランド現象の抑制・緩和対策として、有効な手段の一つと考えられる。一方高木が植栽されている良好な空間を早期に構築するために、樹高のかなりある高木を移植するケースが良く見受けられる。公共用緑化樹木である街路樹に関しては、樹種別樹木の規格基準に準拠した移植樹木の樹高が採用されているようであるが²⁾、民間主導の外構植栽ではこの基準を超える樹高を有した高木移植が行われている。実生や苗木から長期間かけて生育した高木は高い耐風性を示すことが経験上明らかになっているが、移植した受風面積の大きい高木はまだ根系が活着していない状態で風圧力を受けるためその耐風性が問題になることがある。樹木の耐風性は、原位置における樹木の引き倒し試験結果や実験室における風洞実験結果をもとに評価することができ、学問として工学的なアプローチによる研究が緒に就いたのは1970年代のことである³⁾。このMayheadの研究成果を受けて日本においても樹木の耐風性に関する研究が積極的に開始され、有用な研究成果が論文や書籍として公表されるようになった^{4)~7)}。これらの成果から、実生や苗木から大きく生育した樹木の強風下での最大抗力を推定・算出でき、樹木倒伏時の最大風速を概ね予測できるようになった。一方移植した高木は、移植していないものと比較して、その耐風性は小さくなり、強風による倒伏の危険性が高くなる。そのため高木移植の際には、耐風性改善のために、地上支柱や地下支柱が施工される。しかしながら樹木支柱の耐風性向上に対する効果やその設計方法に関しては、実験などをもとに検証されたデータはほとんど開示されておらず、不明点が多いのが実

情である。そこで著者らは、移植していない高木、移植後支柱を設置しない高木、移植後各種支柱によって支持された高木に関して原位置において引き倒し試験を実施し、移植による耐風性への影響、支柱設置の効果、高木移植の安全性などについて実験を行い、得られた研究成果を報告した⁸⁾。同研究により、高木移植時の耐風性に関する有用な知見が得られたと考えられる。しかしながら高木の樹種が1種類であったこと、樹木支柱の効果検証や樹木諸元に合わせた支柱の適用方法などに関する考察が不十分であったこと、樹木の維持管理上必要と考えられる繰返し風圧力を受ける高木の残留変位量(残留傾斜角)に関する検討がなされていないことなど、取り組むべき課題が多く残されていた。本研究は、以上の点に鑑み、樹種ならびに試験体数を大幅に増やすとともに、未検討項目に考察を加え、高木移植時の耐風性に対する安全性を検討する上で、より広く活用できる論文にすることを主目的として実施した。

2. 実験概要

実験は、2013年、2014年および2017年の3回にわたって実施した。実験実施における現地作業としては、① 実験用樹木の調査および選定、② 樹木の各寸法計測、③ 樹木の移植ならびに支柱の設置、④ 樹木の引き倒し試験と各種計測などであった。実験場所は、藤造園建設株式会社木更津農場とした。なお根鉢や支柱のサイズは、国土交通省や各地方自治体が定める基準や標準仕様に基づいて決定した。以下に実験に用いた樹木の種類や諸元といった実験の要因と水準、地上支柱と地下支柱の種類、実験方法と測定項目について述べる。

2.1 実験に用いた樹木の諸元と実験の要因と水準

実験に用いた樹木は、圃場に幼木移植後概ね20年以上が経過し

¹⁾ 都市緑化研究開発集団 代表・工博・樹木医
(〒213-0013 神奈川県川崎市高津区末長2-5-1-503)
²⁾ 直木技術事務所 樹木医 (元イビデングリーンテック(株))

³⁾ (公財) 都市緑化機構 主任研究員・樹木医

¹⁾ Urban Green Research Laboratory, Dr. Eng. and Tree Doctor

²⁾ Naoki Professional Engineer Office, Tree Doctor
(Formerly, Ibiden Greentec Co., Ltd.)

³⁾ Organization for Landscape and Urban Greenery Technology Development, Senior Research Engineer, Tree Doctor

表 1 実験に用いた樹木の植栽条件と諸元

No.	樹種	植栽条件	樹木の諸元測定値							
			樹高 H (m)	枝下高 Hc (m)	幹周 C (m)	枝張 W (m)	根鉢径 drb (m)	根鉢高 hrb (m)	樹木重量 Ww (kN)	
1	クスノキ	移植無	10.3	2.6	1.02	4.9	—	—	—	
2			8.3	1.9	0.65	3.6	—	—		
3			8.0	2.0	0.59	3.4	—	—		
4			9.5	1.2	0.97	4.3	1.50	1.00		
5		地上支柱	9.0	1.8	0.72	4.1	1.25	0.80		
6			7.3	2.1	0.55	2.9	1.05	0.70		
7			10.3	1.6	1.00	4.5	1.60	1.18		
8			8.2	2.1	0.72	4.1	1.15	0.80		
9		地下支柱	7.5	1.6	0.60	3.6	1.20	0.85		
10			移植無	11.0	4.7	0.84	4.0	—		—
11			支柱無	11.0	2.0	0.76	3.0	1.58		0.91
12				11.3	2.5	1.08	6.1	1.96		1.16
13		地上支柱	11.1	4.0	0.91	4.5	1.68	0.91		
14			10.4	3.0	0.90	4.0	1.82	1.06		
15			11.3	4.0	0.95	5.0	1.92	1.07		
16			11.5	4.5	0.82	4.0	1.37	0.83		
17		地下支柱	11.6	2.8	0.84	5.0	1.79	1.04		
18	ヤマザクラ	移植無	10.0	3.5	0.55	4.0	—	—		
19			10.0	4.0	0.58	4.0	—	—		
20			9.5	2.5	0.67	2.6	—	—		
21			9.5	2.5	0.59	2.2	—	—		
22		支柱無	9.0	3.1	0.61	4.8	1.30	0.80		
23			9.0	3.4	0.64	4.0	1.50	0.95		
24		地上支柱	9.0	3.0	0.48	3.8	1.45	0.90		
25		地下支柱	9.0	2.4	0.55	3.3	1.30	0.85		
26		移植無	6.0	1.5	0.33	2.0	—	—		
27			6.0	1.2	0.31	1.8	—	—		
28			6.0	1.3	0.32	2.0	—	—		
29			シラカシ		6.0	1.1	0.30	1.8	0.90	0.50
30		支柱無	6.0	1.1	0.31	2.0	1.00	0.55	4.5	
31			地上支柱	6.0	1.1	0.35	2.0	0.90	0.50	
32			地下支柱	6.0	1.0	0.36	2.5	0.90	0.50	
33			地上支柱	6.0	1.1	0.35	2.0	0.90	0.50	

たクスノキ、移植後約 15 年が経過したヤマザクラ、移植後約 10 年が経過したシラカシとした。これらの樹種を選定した理由は、① 高木植栽として街路樹や外構植栽によく利用されている広葉樹であること、② 耐風性に影響を及ぼす樹木根系の分布状況が異なるタイプであること、③ 圃場で所定品質のものを複数本確保できること、④ 実験を容易に実施できる場所に植栽されていることなどからである。なお②に関しては、根系分布状況を垂直分布・水平分布・分岐性で分類すると、クスノキが中間型・分散型・疎放型、ヤマザクラが浅根型・中間型・中間型、シラカシが中間型・集中型・多岐型に相当する⁹⁾。圃場にあるこれら各種樹木の中から、表 1 に示す 32 本を選定して引き倒し試験に供した。2013 年の実験では、クスノキを実験用樹木として、移植をしていないもの、移植後地上支柱を設置したもの、移植後地下支柱を設置したものに関して各々樹高を変化させて各 3 本合計 9 本について引き倒し試験を実施した(供試体 No.1～9)。2014 年の実験では、10m 超の樹高を有するクスノキ 8 本を選定して繰返し実験を実施するとともに、移植後支柱を設置しない条件の供試体を 2 本加えて載荷試験を実施した(供試体 No.10～17)。なお 2014 年以降の実験では、樹木重量が引き倒し試験結果に及ぼす影響を確認するために、2013 年に計測しなかった樹木重量を計測項目に加えた。2017 年の実験では、実験用樹木をヤマザクラとシラカシとし、過去 2 回の実験結果を踏まえて、樹種の相違が耐風性に及ぼす影響を比較検証するとともに、併せて繰返し載荷試験を行うことにより高木の残留傾斜角の測定・評価を行った(供試体 No.18～32)。

2.2 地上支柱と地下支柱について

移植後の樹木の倒伏などに対する抵抗性を向上させるために、一般に支柱が施工される。本実験では、移植高木の耐風性を向上させるために使われている支柱の種類や設置方法の相違などが耐風性にどのような影響を及ぼすかについて検証した。

地上支柱は、樹種がクスノキの場合では、最も樹高の低い No. 6 供試体に二脚鳥居組合せ支柱を、その他の供試体にやぐら支柱を採用した(写真 1 参照)。樹種がヤマザクラとシラカシの場合では、ハツ掛け支柱を採用した(写真 1 参照)。また 2013 年の実験結果を踏ま

(1)二脚鳥居組合せ支柱 (2)やぐら支柱 (3)ハツ掛け支柱

写真 1 地上支柱設置状況

写真 2 やぐら支柱の根入れ部・根入れ長 150 cm

写真 3 地下支柱設置状況

写真 4 引き倒し試験実施状況

図 1 引き倒し試験載荷模式図

えて、2014 年に実施した No.13～15 の供試体では、写真 2 に示すように地上支柱の耐風性改善を目的として、支柱縦材(主材)の根入れ長を 60cm、105cm、150cm と変化させてその効果を検証した。地下支柱は、写真 3 に示すように、スライド式ベース板タイプのもので使用した。

2.3 実験方法と測定項目

土木工学や農学の分野では、流水や風による樹木の倒伏(根返り)に対する抵抗性を、これら外力を直接樹木に作用されるのではなく、樹木の引き倒し試験によって得られる倒伏最大モーメントで評価してきた。本研究においても、樹木の耐風性をこの方法で評価することにした。樹木への引張荷重の載荷は、地上より高さ 2.5m の位置の樹幹に玉掛け用繊維スリング(スリングベルト)を取付け、もう一方は定格容量 60kN(6t)のレバブロックを 0.4 m³油圧ショベルのバケット上のフックに取付け、これらを水平になるように繋いで引張った。引張る方法と手順は、以下のとおりである。まずレバブロックを巻上げるにより初期載荷を行い、その後油圧ショベル

表 2 载荷試験結果

No.	樹種	植栽条件	胸高直径 Db (cm)	倒伏最大モーメント M _{max} 作用時の荷重 P _{Mrmax} (kN)	傾斜角 θ _{Mrmax} (°)	倒伏最大 モーメント M _{max} (kNm)
1	クスノキ	移植無	32.5	60.1	9	141.0
2			20.7	20.0	15	48.3
3			18.8	21.2	28	45.6
4		地上支柱	30.9	20.5	10	48.0
5			22.9	11.4	7	28.2
6			17.5	6.0	16	14.4
7		地下支柱	31.8	12.1	20	26.8
8			22.9	13.4	36	25.7
9			19.1	7.1	30	14.9
10		移植無	26.7	43.6	12	106.6
11		支柱無	24.2	6.5	7	16.2
12			34.4	10.0	2	25.1
13			29.0	19.3	5	48.0
14		地上支柱	28.6	23.4	10	57.7
15			30.2	25.5	10	62.9
16			26.1	11.9	15	28.6
17		地下支柱	26.7	19.6	15	47.2
18	ヤマザクラ	移植無	17.5	8.0	5	19.9
19			18.5	7.5	10	18.4
20			21.3	15.5	8	38.4
21			18.8	7.5	8	18.6
22		支柱無	19.4	4.5	17	10.7
23			20.4	5.5	10	13.5
24		地上支柱	15.3	13.0	5	32.4
25		地下支柱	17.5	7.0	17	16.7
26	シラカシ	移植無	10.5	4.5	11	11.0
27			9.9	12.0	47	17.6
28			10.2	4.5	17	10.7
29			9.5	1.5	7	3.7
30		支柱無	9.9	2.0	10	4.9
31			11.1	6.0	4	15.0
32			11.5	6.0	30	12.5

注) 胸高直径Db (cm)は、測定した幹周を円周率πで除して算出した。

により引張った。载荷荷重の値は、スリングベルトとレバーブロックの間にセットした引張荷重計（定格荷重 100kN(10t)のロードセル）の電圧出力計測値から算出した。また樹木は载荷によって鉛直に自立した状態（傾斜角 0°）から回転変位するので、併せて変位測定を実施した。変位測定算出方法は、ビデオカメラによる定点撮影映像から各载荷荷重時の傾斜角を測定算出する方法とした。引き倒し試験状況を写真 4 に示す。なお移植をしていない No. 1 供試体に関しては、油圧ショベルでは倒伏最大モーメントに至らなかったため、160kN (16t)ホイールクレーンに盛り替え、巻き上げ载荷によって倒伏させた。

2.4 測定結果の評価方法

作用倒伏モーメントは、図 1 の引き倒し試験载荷模式図に示した測定値を用いて、下式(1)によって算出した。この载荷試験によって得られた最大作用モーメント（倒伏最大モーメント）の大きさによって、移植の有無などによる高木の耐風性を評価した。

$$M_i = P_i \cos \alpha_i \times h_1 \cos \theta_i - P_i \sin \alpha_i \times h_1 \sin \theta_i \quad (1)$$

$$(\quad = P_i \cos (\alpha_i + \theta_i) \times h_1)$$

ここに、 M_i ：作用倒伏モーメント(Nm)、 P_i ：载荷荷重(N)、 α_i ：载荷荷重方向と地表面とのなす角度(deg)であり、 $\alpha_i = \sin^{-1} ((h_2 - h_1 \cos \theta_i) / L_1)$ で算出した、 θ_i ：樹木の傾斜角(deg)、 h_1 ：供試体樹木に引張用スリングベルトを取付ける高さ(m)、 h_2 ：油圧ショベル側スリングベルト取付け高さ(バケットのフック位置の高さ)であり、ほとんどの試験では $h_2 = h_1$ (m)とした、 L_1 ：供試体樹木芯から油圧ショベル側スリングベルト取付け位置(フック位置)までの距離(m)

一方気体や液体の流れの中に置かれた物質に作用する力（抗力）は、一般に下式(2)によって算出できる。

$$M_r = 1/2 C_D \rho V^2 A h \quad (2)$$

ここに、 M_r ：抗力モーメント(Nm)、 C_D ：抗力係数、 ρ ：空気密度

注) 既往データの上限値は示されていないが本実験データ(回帰式)の上側に位置する。

図 2 樹木の胸高直径と倒伏最大モーメントとの関係

でここでは 1.22 とした(kg/m³), V ：風速(m/s), A ：受風面積(m²), h ：受風重心(m)。

同式を用いることで風圧力によって樹木地際部に作用するモーメントを算出することができ、引き倒し試験で得られた倒伏最大モーメントの値を抗力モーメントとして代入することで倒伏時の風速を算定することができる。そこで以下の仮定のもとに樹木倒伏時の風速を算出した。すなわち樹木の抗力係数 C_D は、樹木がソリッドで剛性の大きな物質ではなく、樹冠部に隙間があり枝葉や幹に可撓性があるので、こういった要素を抗力係数の中に包含して考えることになる。既往の研究成果によると^{3), 6)}、抗力係数は風洞実験や野外実験から測定算出できる。Mayhead は針葉樹を用いた風洞実験を行い、抗力係数を求めた。その結果抗力係数は、0.15～0.72 の値になり、風速の増加に伴って抗力係数が小さくなることを明らかにした。小泉は広葉樹と針葉樹を用いた野外実験を行い、抗力係数を求めた。その結果広葉樹の抗力係数は、針葉樹より小さくなり、風速 30m/s 下では 0.1～0.3 の値になった。これら研究成果と本実験条件を照らし合わせ、抗力係数を 0.3 および 0.2 として樹木倒伏時の風速を算出することとした。また受風面積は樹冠と樹幹の総和とし、樹幹は長方形として、樹冠は楕円形として面積を算定した。

3. 実験結果と考察

引き倒し試験で得られた倒伏最大モーメント発生時の载荷荷重、傾斜角ならびに倒伏最大モーメントをまとめると表 2 のようになる。この測定算出結果、樹木の倒伏状況、樹木の移植条件、樹木の諸元などをもとに、以下において、高木移植が耐風性に及ぼす影響、支柱の効果や壊れ方、倒伏に対する安全性の評価ならびに維持管理上必要と考えられる風圧力作用下における残留傾斜角について記述する。

3.1 各種要因が倒伏最大モーメントに及ぼす影響

樹木の倒木に対する抵抗性は、樹木の引き倒し試験から求められる倒伏最大モーメントで概ね評価できる。そこで本実験結果を樹木の胸高直径と倒伏最大モーメントとの関係で整理すると、図 2 に示すとおりになった。一般に実生や苗木から長期間かけて生育した(移植をしていない)樹木では、倒伏最大モーメントと胸高直径や材積な

(クスノキ No.1 供試体 根系サイズ約 $\phi 5\text{m} \times \text{h} 2\text{m}$)

写真5 移植していない樹木の引き倒し試験後の根系の大きさ

写真6 支柱の引き抜け状況

写真7 載荷後の地下支柱縦材の状況

写真8 支柱上部固定端のずれ発生

写真9 改良型地下支柱

どとの間に、樹種や植栽環境などの相違によって傾向が変わるとはいうものの、良好な相関性が認められている^{4), 10)}。本実験結果においても、移植していない3樹種11試験体の胸高直径と倒伏最大モーメントとの間には高い相関性が認められた。すなわち前報⁸⁾から樹種ならびに試験体数を大幅に増やして回帰曲線を求めたが、ばらつきはそれほど大きくならず決定係数 R^2 は1に近く、高精度の回帰式が得られた。したがって高木の胸高直径が分かれば、倒伏最大モーメントを概ね推定できることが確認できた。同試験結果は、樹種の異なる河道内樹木を対象とした既往のデータによる回帰式とその上限値⁴⁾との間に分布する結果になった。また林学分野におけるスギ、ナラ、ブナの引き倒し試験による回帰式と比較すると、算定値はスギ、ブナ、ナラの順に大きくなるのだが、本実験結果はブナの回帰式算定値とほぼ一致した⁴⁾。なお移植していない樹木の倒伏最大モーメントは、移植したものと比較して顕著に大きな値を示し、最大で140kNm程度の値になった。移植していない同クスノキの試験後の根系の大きさは、写真5に示すとおりであり、掘り起こした太根根系は直径方向で約5m、深さ方向で約2mの寸法を有していた。このような根系を有することによって大きな倒伏最大モーメントが得られるのである。

一方移植した樹木の倒伏最大モーメントは顕著に小さくなり、支柱を設置した場合でも、移植していないものと比較して、最大で概ね1/5まで低下した。しかしながら支柱で支持した樹木の倒伏最大モーメントは、移植していない樹木に関する既往のデータ⁴⁾の下限値を全て上回る結果になっていた。このように移植樹木の耐風性は支柱設置である程度改善できるが、さらに高い耐風性が望まれる場合には、2種類の支柱を併用するといった対策を講ずることも肝要かと考えられる。なお移植していない樹木の材積と倒伏最大モーメントとの間にも、一般に言われているような相関性(強い線形関係)

図3 支柱の耐風性改善効果

表3 樹木倒伏時の算定風速

No.	樹種	植栽条件	倒伏風速 $V_{CD0.3}$ (m/s)	倒伏風速 $V_{CD0.2}$ (m/s)	No.	樹種	植栽条件	倒伏風速 $V_{CD0.3}$ (m/s)	倒伏風速 $V_{CD0.2}$ (m/s)
1	クスノキ	移植無	63.3	77.5	18	ヤマザクラ	移植無	28.0	34.3
2			53.4	65.4	19			27.5	33.7
3			55.6	68.1	20			49.2	60.3
4		地上支柱	41.8	51.2	21		支柱無	37.2	45.6
5			35.0	42.9	22			20.8	25.5
6			37.5	45.9	23			25.9	31.7
7		地下支柱	28.3	34.6	24		地上支柱	40.4	49.5
8			37.2	45.5	25			30.5	37.3
9			32.7	40.0	26			47.6	58.3
10		移植無	60.7	74.3	27	シラカシ	移植無	62.6	76.7
11			25.3	31.0	28			46.5	57.0
12			21.7	26.5	29			28.7	35.2
13		支柱無	37.0	45.3	30		支柱無	31.3	38.4
14			44.8	54.9	31			54.6	66.9
15			39.4	48.2	32			44.6	54.7
16		地下支柱	29.6	36.2					
17			32.1	39.3					

ととの間にも、一般に言われているような相関性(強い線形関係)¹⁰⁾が確認された。

3.2 支柱の耐風性改善効果

前報⁸⁾では、移植したクスノキの耐風性を改善する目的で設置した各種樹木用支柱の効果を検証した。

その結果、2013年に実施した実験では、地上支柱縦材の引き抜けによって倒伏に至ったことにより、その改善効果はあまり大きくなかった。とりわけ二脚鳥居組合せ支柱ではその改善効果が顕著に小さくなった(写真6参照)。また地下支柱に関しても、地上支柱と同様に、改善効果は小さかった。これは引き倒し試験荷重載荷により根鉢を囲む支柱部材である縦材が折れ曲がって大きく変形したためと考えられる(写真7参照)。すなわち地下支柱の設置により効果的に倒伏最大モーメントを増大させるには、支柱縦材のさらなる剛性アップが必要と考えられる。

2014年実施のやぐら地上支柱を用いた実験では、支柱縦材の引き抜けを考慮して、支柱縦材の根入れ長を変化させて実験を実施した。その結果、支柱縦材の引き抜けはほとんどなくなったが、根入れ長を大きくする効果は顕著には認められなかった。支柱縦材の根入れ長を大きくした場合の倒伏の仕方は、支柱縦材・支柱上部横材・樹幹の相互固定部分における変形やずれなどによって、支柱縦材に荷重が伝播できなくなり倒伏に至ったものと考えられる(写真8参照)。根入れ長の効果を十分発揮できるようにするには、縦材・横材・樹幹との相互固定方法を十分検討する必要があると考えられる。

2017年の実験では、樹種、樹木諸元、支柱の種類などを変えて引き倒し試験を実施した。2013~2017年に実施したこれらの実験結果を樹種別に整理して、胸高直径と倒伏最大モーメントとの関係で

図4 作用倒伏モーメントと傾斜角との関係(1)

図5 作用倒伏モーメントと傾斜角との関係(2)

図6 繰返し載荷による残留傾斜角の推移(1)

図7 繰返し載荷による残留傾斜角の推移(2)

図8 残留傾斜角と推定作用風速との関係

写真 10 シラカシの繰返し載荷による引き倒し試験状況とその可撓性

示すと図3のようになる。樹高が10m前後で胸高直径が25~30cm程度のクスノキでは、やぐら支柱を適用することで、支柱のないものと比較して、倒伏最大モーメントが30~40kNm程度大きくなった。樹高が10m前後で胸高直径が15~20cmのヤマザクラでは、ハツ掛け支柱の適用により、倒伏最大モーメントが20kNm程度大きくなった。樹高が6mで胸高直径10cm前後のシラカシでは、ハツ掛け支柱を適用することで、倒伏最大モーメントが10kNm程度大きくなった。すなわち採用する支柱によってその耐風性改善効果には差が認められ、今回の実験では、やぐら支柱の方がハツ掛け支柱よりも設置効果が大きいようであった。しかしながらヤマザクラとシラカシの場合では、ハツ掛け支柱設置によって、倒伏最大モーメントの値が移植前の値程度まで大きくすることができた。すなわち樹高や枝張をある程度抑えた移植高木を適用すれば、支柱設置により移植前の耐風性程度まで改善ができることが検証された。一方地下支柱に関しては、2013年および2014年の結果を受けて、地下支柱の部材剛性を大きくした改良型地下支柱を設置して、実験を実施した(写真9参照)。その結果、改善効果は確認されたものの、期待できるほどの顕著な改善効果は得られなかった。これは縦材の剛性は確保されたものの、施工性を考慮して縦材がベース部材に固定されていなかったことから、載荷時に縦材が滑って荷重伝達されなかったためと考えられる。地下支柱に関しては、倒伏最大モーメントを大きく増加改善でき、コストを抑えるとともに、良好な施工性を有するものが提供されることが望まれる。

3.3 高木倒伏時の風速

樹木の倒伏最大モーメント発生時の風速を前述の式(2)をもとに算定すると、表3に示すとおりになった。算出された風速は、抗

力係数を0.3と仮定すると20.8~63.3m/s、抗力係数を0.2と仮定すると25.5~77.5m/sの範囲の値になり、前報の結果⁸⁾とほぼ同程度の範囲に収まった。前報では、倒伏に対する抵抗性は、移植していないものが最も大きく、次いで地上支柱、地下支柱、支柱なしの順であったが、今回の結果では異なった傾向が示された。すなわち移植したヤマザクラとシラカシに支柱を設置した場合の効果が顕著に認められた。とりわけ樹高が低く枝張の小さいシラカシでは、移植なしのものと遜色のない倒伏風速が得られたのである。また今回の実験条件下において、抗力係数を0.2とした場合、樹高10m程度の樹木を移植しても、支柱を設置することにより、例えば多くの地域で採用されている設計基準風速34m/sを上回る結果(耐風性)が得られたと考えられる。

3.4 風圧力作用下における樹木の傾きとその復元性

引き倒し載荷による樹木の傾斜角と作用倒伏モーメントの関係は、図4~5に示すとおりになった。これらの傾斜角は、載荷荷重の増加にともなって大きくなり、倒伏最大モーメント作用以降はモーメントが低下しながら傾斜角が大きくなるという、いわゆる材料が降伏した後に示す変形状と同様の傾向を示した。またこの倒伏最大モーメント作用時における樹木の傾斜角 θ_{Mrmax} は、表2に示したように、2~47°(平均で約14°)と大きくばらつく結果になった。これは樹種、植栽条件、樹木諸元などの相違によるものと考えられる。例えば繰返し載荷を行ったNo.27のシラカシでは、写真10に示すように樹幹の可撓性が顕著に大きいことから、小さな載荷荷重時においても大きな傾斜角になったからである。一般的に強風が吹くと、樹木はその可撓性により大きく傾き、風圧力を逃がす。その後強風が治まると、樹体の姿勢は元に戻る。しかしながら大きな倒

伏モーメントが作用すると、姿勢を元に戻しきれず、残留傾斜角が生ずることになる。つまりここで問題になるのは、倒伏最大モーメント作用時の傾斜角ではなく、風が治まった後の樹木の姿勢である。傾いた樹木は景観上ならびに安全上問題になることがあり、そのようなケースではクレーンなどによって樹木の姿勢を治すことが維持管理上必要になってくる。そこで今回の実験では、移植していないヤマザクラ（No.19 供試体）とシラカシ（No.27 供試体）に繰返し載荷を行い、モーメント比（作用倒伏モーメントを倒伏最大モーメントで除した値）と残留傾斜角との関係で整理・検討した。その結果は図 6～7 に示すとおりになり、以下のことが明らかになった。すなわち移植していないヤマザクラのケースでは、モーメント比が 74%まで上昇しても、残留傾斜角は 0° のままであった。一方シラカシの場合では、モーメント比が 28, 42, 56, 68, 76%と上昇するにつれて、残留傾斜角も 1, 2, 3, 5, 8° と大きくなった。このような結果になったのは、樹種、樹木諸元、根張状況などの相違に起因するものと考えられる。都市の中で樹木の倒れ（傾斜）が目立つようになる角度は概ね 5° 前後と考えられ、この程度以上の倒れが生じた場合に倒れの修正・補強などといった維持管理が必要になると考えられる。今回の実験では、都市の設計基準風速が作用した場合でも移植をしていない高木では、当該風速作用後の残留傾斜角が 5° 以内に納まる結果になった（図 8 参照）。しかしながら移植後間もない高木では、支柱を設置した場合でも強風後に大きな倒れを生じ、支柱のやり直しなどが必要になることが多く発生することも危惧される。このことから、支柱を設置した移植高木の繰返し載荷実験の実施も必要と考えられる。

4. 結論

高木広葉樹 3 種類 32 供試体を用いてさまざまな植栽条件下で引き倒し試験を実施し、移植高木の風害に対する安全性の検証を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 高木広葉樹の倒伏最大モーメントと胸高直径との間には高い相関性があり、胸高直径が分かれば倒伏最大モーメントを精度よく推定できると考えられる。
- (2) 移植高木に支柱を設置した場合の倒伏最大モーメントは、移植していない同程度の樹木諸元を有するものと比較して、最大で 1/5 程度まで低下した。
- (3) 樹高や枝張がある程度抑えられた胸高直径の比較的小さい移植高木では、支柱設置により、移植していない同程度の樹木諸元を有するものと比較しても、遜色のない耐風性を確保できると考えられる。
- (4) 支柱を設置した移植高木では、抗力係数を 0.2 と仮定した場合、多くの地域で採用されている設計基準風速 34m/s 程度以上の風速に耐えることができると考えられる。
- (5) 移植していない高木では、都市における設計基準風速が作用した場合でも残留傾斜角は小さく、樹木の倒れなどの問題が生ずることは少ないと考えられる。しかしながら支柱を設置した移植高木では、大きな倒れが生じやすいことが危惧されることから、移植高木の繰返し載荷による耐風性の検証が今後必要と考えられる。

樹高や枝張が極端に大きい高木を移植した場合、コスト、施工性、資材調達などの観点から、十分な耐風性改善効果が得られる支柱を

提供することは現状では難しいと考えられる。また仮に十分な性能を有する支柱を採用できたとしても、移植樹木自体が生理的に大きなストレスを受けて少なからず生育上の課題が生ずるとも考えられる。高木移植の際には、以上のことを踏まえて、樹木諸元を決めることが肝要と言える。

なお今後の課題としては、次のとおりである。すなわち樹木支柱の設置効果に関しては、未だ確立された算定方法がなく、定量化もできていないのが実情である。この課題を解明するには、土質力学に基づいた研究の実施などが望まれる。また海外では、樹木の風に対する挙動を有限要素法を用いた数値シミュレーションによって解析する試みもなされている¹¹⁾。実験によるアプローチだけでなく、こういった数値解析による研究開発が日本においても今後必要になると考えられる。

謝辞

本研究は、（公財）都市緑化機構 特殊緑化共同研究会 調査研究部会 緑化技術分科会の研究業務として実施したものである。研究の実施に当たっては、同分科会に割り当てられた6か年の研究予算を使わせていただくとともに、研究会メンバーとりわけ緑化技術分科会メンバー（イビデングリーンテック（株）・日本地工（株）・ダイトウテクノグリーン（株）・グリーン&ウォーター（株）・内山緑地建設（株）・他）の多大な協力をいただいた。さらに実験用樹木や実験場所（圃場）に関しては、藤造園建設（株）に協力・提供していただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) （社）日本造園建設業協会：街路樹剪定ハンドブックー美しい街路樹づくりに向けてー，pp.7～54，2006
- 2) 国土交通省 都市・地域整備局公園緑地・景観課緑地環境室監修：公共用緑化樹木等品質寸法規格基準(案)の解説，日本緑化センター，2009
- 3) G. J. Mayhead：Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies, *Agricultural Meteorology*, Vol.12, pp.123～130, 1973
- 4) 建設省河川局治水課監修・（財）リバーフロント整備センター編集：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案），山海堂，pp.20～35，1994
- 5) 小泉章夫・平井卓郎・笠康三郎・中原亮・新谷克教・清水英征：ニセアカシア街路樹の耐風性，北海道大学演習林研究報告，第64巻，第2号，pp.105～112，2007
- 6) 小泉章夫：樹冠の抗力係数と樹形計測に基づいた緑化樹木の耐風性診断，科学研究費助成事業研究成果報告書（2012年度），2013
- 7) 中村哲世・小泉章夫・寺西真隆・池田啓輔：札幌市あいの里地区街路樹の耐風性評価試験，樹木医学研究，第12巻，4号，pp.209～210，2008
- 8) 橘大介・直木哲・今井一隆：高木植栽時の耐風性に関する一考察，日本建築学会技術報告集，第23巻，第55号，pp.1075～1078，2017
- 9) 荻住昇：最新樹木根系図説，誠文堂新光社，2010
- 10) 藤堂千景・山瀬敬太郎・谷川東子・大橋瑞江・池野英利・檀浦正子・平野恭弘：間伐がスギの最大引き倒し抵抗モーメントにもたらす影響，日本緑化工学会誌，41（2），pp.308～314，2015
- 11) Kenneth R. James, Gregory A. Dahle, Jason Grabosky, Brain Kane, and Andreas Detter: Tree Biomechanics Literature Review: Dynamics, *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(1), pp.1～15, 2014

[2018 年 2 月 6 日原稿受理 2018 年 4 月 10 日採用決定]