高木植栽時の耐風性に関する一考察

CONSIDERATION ON THE RESISTANCE TO WIND DAMAGE 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

This paper demonstrates the resistance to wind damage of tall trees which intends to be decreased by transplants. The objectives of this study are to clarify that how much the resistance to wind damage of the transplanted tall trees is improved by applying some supporting systems to them. At the same time, the safety of the transplanted tall trees against strong winds is discussed. Various useful information was obtained from the results that we had conducted pull-down loading tests of seventeen tall camphor trees.

1. はじめに

大都市の建物外構や街路などに生育する樹高のある高木類は、都市景観や建物外構部分を構成する要素として、美観・衛生・保安・境界・生態系保全などのきわめて重要な役割を果たしてきた。とりわけ近年の地球温暖化やヒートアイランド現象の対策として、高木類の植栽は有効な手段の一つと考えられる。一方高木類などがある良好な緑化空間を早期に構築するために、樹高がかなりある高木類を移植するケースがよく見受けられる。実生や苗木から長期間かけて生育した高木類は、その根系が十分伸長生長することによって高い耐風性を示すことが経験上明らかになっている。一般に移植をしていない樹木の耐風性は引き倒し試験結果や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本格的にスタートしたのは1970年代初頭のことと考えられる¹⁾。こ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、有用な成果が論文や書籍として出版されるようになった^{2)~4)}。これらの研究成果によって、強風下に置かれた樹木に作用する最大抗力が推定または算出でき、樹木転倒時の最大風速を概ね推測できるようになった。一方移植した高木類では、根系の生育が不十分である移植初期の期間ではその耐風性が小さく、強風により倒伏する危険性が高くなる。そのため高木類を移植する際には、移植初期における耐風性を改善・確保するために、地上支柱や地下支柱が施工される。しかしながら樹木用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、実際に実験などを通じて検証されたデータがほとんどないのが実情である。そこで本研究は、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検討することを主目的として実施した。

2. 実験概要

実験は、2013年および2014年の2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諸元や実験の要因と水準、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、圃場に移植後概ね20年以上が経過したクスノキであり、幼木移植時の目通り周は概ね20cm程度であった。圃場にあるクスノキの中から、表1に示す17本を選定して引き倒し試験に供した。1年目の2013年では、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）。2年目の2014年では、10m超の樹高を有するものを合計8本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年は、根鉢の引き倒しに対する抵抗性を確認することを目的として、1年目に計測しなかった樹木重量を計測項目に加えた。

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、写真1~2に示すように、最も樹高の低いNo.6供試体に二脚鳥居居合せ支柱を、その他の供試体にやぐら支柱を採用した。また1年目の実験結果を踏まえて、2年目に実施したNo.13~15の供試体では、写真3に示すように、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4に示すように、スライド式ベース板タイプのも

¹⁾ 都市緑化研究開発集団 代表・工博
(〒213-0013 神奈川県川崎市高津区末長2-5-1-503)
²⁾ イビデングリーンテック(株)東京支店技術設計部
³⁾ (公財)都市緑化機構

¹⁾ Urban Green Research Laboratory, Dr. Eng.

²⁾ Ibidem Greentec Co., Ltd.

³⁾ Organization for Landscape and Urban Greenery Technology Development

表 1 実験に用いた樹木の植栽条件と諸元

No.	植栽条件	樹木の諸元測定値						樹木重量 W _w (kN)
		樹高 H (m)	枝下高 H _c (m)	幹周 C (m)	枝張 W (m)	根鉢径 d _{rb} (m)	根鉢高 h _{rb} (m)	
1	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	地下支柱	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		7.5	1.6	0.60	3.6	1.20	0.85	
10	移植無	11.0	4.7	0.84	4.0	—	—	18.6
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		11.1	4.0	0.91	4.5	1.68	0.91	
14	地上支柱	10.4	3.0	0.90	4.0	1.82	1.06	22.3
15		11.3	4.0	0.95	5.0	1.92	1.07	28.4
16	地下支柱	11.5	4.5	0.82	4.0	1.37	0.83	12.7
17		11.6	2.8	0.84	5.0	1.79	1.04	24.4

のを使用した。

2.3 実験方法と測定項目

樹木の耐風性は、樹木を引張ることによって生ずる倒伏最大モーメントで評価した。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)のレバーブロックを 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。まずレバーブロックを巻上げることにより初期載荷を行い、その後油圧ショベルにより引張った。載荷荷重の値は、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。また樹木は載荷によって鉛直に自立した状態(回転角 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載荷荷重時の回転角を測定算出する方法とした。載荷状況を写真 5 に示す。なお移植をしていない No. 1 供試体において、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、巻き上げ載荷によって倒伏させた。

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載荷荷重と回転角ならびに倒伏最大モーメントを表 2 に示す。この測定算出結果、樹木の倒伏状況ならびに樹木の諸元測定値などをもとに、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ならびに倒伏に対する安全性などについて記述する。

3.1 高木移植による耐風性への影響

樹木の耐風性は、樹木の引張載荷時の倒伏最大モーメントで概ね評価できる。またこの倒伏最大モーメントと樹木の胸高直径や材積などとの間には、樹種の相違などによって傾向が変わるとはいうものの、良好な相関が認められている^{2), 6)}。そこで本実験結果を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 1 に示すとおりになり、移植していない樹木の胸高直径と倒伏最大モーメントの間には一般に言われているような良好な相関性が確認された。

写真 1 二脚鳥居組合せ支柱
(No.6 供試体)

写真 2 やぐら支柱
(No.4 供試体)

写真 3 やぐら支柱の根入れ部
(No.15 供試体 根入れ長 150 cm)

写真 4 地下支柱設置状況
(No.7 供試体)

写真 5 引き倒し試験載荷状況 (No.1 供試体)

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との間に分布するものとなった。また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

表 2 载荷試験結果

No.	植栽条件	倒伏最大モーメント M_{rmax} 作用時の荷重 P_{Mrmax} (kN)	回転角 θ_{Mrmax} (°)	倒伏最大 モーメント※ M_{rmax} (kNm)
1	移植無	60.1	9	141.0
2		20.0	15	48.3
3		21.2	28	45.6
4		20.5	10	48.0
5	地上支柱	11.4	7	28.2
6		6.0	16	14.4
7		12.1	20	26.8
8		13.4	36	25.7
9	地下支柱	7.1	30	14.9
10		43.6	12	106.6
11		6.5	7	16.2
12		10.0	2	25.1
13	移植無	19.3	5	48.0
14		23.4	10	57.7
15		25.5	10	62.9
16		11.9	15	28.6
17	支柱無	19.6	15	47.2

※倒伏最大モーメント M_{rmax} は樹木の回転によって斜めに作用する
 载荷荷重を水平分力と鉛直分力に分け合算して算出した。

図 1 樹木の胸高直径と倒伏最大モーメントとの関係

て顕著に大きな値を示し、最大で 140kNm 程度の値になった。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、概ね 1/2~1/3 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²⁾の下限値をすべ
 て上回る結果になった。この実験結果においてとりわけ注目すべき
 点は、移植した樹木は支柱設置によりその耐風性は改善されるが、
 支柱による改善効果はかなり小さいという結果になったことである。

写真 6 支柱縦材・根杭の引き抜き状況 (No.4 供試体)

写真 7 支柱上部固定端の抑えが効かずずれが発生 (No.14 供試体)

写真 8 掘り起こされた载荷後の地下支柱 (供試体 No.16)

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相関性 (強い線形関係)⁶⁾が認められた。

3.2 樹木支柱の効果が小さい原因とその改善方法

従来から使用されている樹木用支柱の耐風性改善効果が期待に反
 して小さかったことから、樹木倒伏時の支柱を構成する各部材の状
 態を検証することで、今後の支柱の性能改善方法を検討してみた。

地上支柱では、1 年目の実験結果において、二脚鳥居組合せ支柱

表 3 樹木倒伏時の算定風速

No.	植栽条件	倒伏風速 V _{CD0.3} (m/s)	倒伏風速 V _{CD0.2} (m/s)
1	移植無	63.3	77.5
2		53.4	65.4
3		55.6	68.1
4	地上支柱	41.8	51.2
5		35.0	42.9
6		37.5	45.9
7	地下支柱	28.3	34.6
8		37.2	45.5
9		32.7	40.0
10	移植無	60.7	74.3
11	支柱無	25.3	31.0
12		21.7	26.5
13		37.0	45.3
14	地上支柱	44.8	54.9
15		39.4	48.2
16		29.6	36.2
17	地下支柱	32.1	39.3

とやぐら支柱がともに支柱縦材の引き抜けによって倒伏に至った(写真 6)。そこで 2 年目の実験では、支柱縦材の根入れ長を 30cm から 60, 105, 150cm に設定して実験を実施したところ、支柱縦材の引き抜けはなくなったが、根入れ長を大きくする効果は顕著ではなかった。得られた倒伏最大モーメントは根入れ長が大きくなるにつれて大きくなったが、これには根鉢サイズや樹木重量の増加による効果も含まれている。つまりその部分を差し引くと根入れ長を大きくした効果はあまり得られなかったと考えられる。支柱縦材の根入れ長を大きくした場合の倒伏の仕方は、写真 7 に示すように、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。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。

地下支柱の効果を十分発揮させるには、ベース板などの十分な支圧面積と各部材の適度な剛性が必要とされる。地下支柱の効き方を確認するために、写真 8 に示すように、引き倒し試験終了後に地下支柱を掘り起こして載荷後の状態を確認した。載荷倒伏後の地下支柱では、固定用の縦材が折れ曲がって大きく変形していたことから、縦材のさらなる剛性アップがとりわけ倒伏最大モーメントの増大に有効であるという結果になった。

3.3 倒伏に対する安全性の評価

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(1)によって算出されている。

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

ここに、 M_r : 抗力モーメント(Nm)、 C_D : 抗力係数、 ρ : 空気密度でここでは 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、実験で得られた倒伏最大モーメント作用時の風速を算定することが可能になる。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、こういった要素も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), 4)}、概ね 0.3 または 0.2 で評価しているので、この値を用いた。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。風速算定結果は、表 3 に示すとおりである。

樹木が倒伏する最大モーメント発生時の風速は、抗力係数 0.3 で 21.7~63.3m/s、抗力係数 0.2 で 26.5~77.5m/s の範囲の値になった。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、支柱なしの順になった。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)になったといえる。

4. まとめ

樹高 10m クラスのクスノキを用いて、引き倒し試験を行い、移植後の耐風性を評価した。移植後の樹木の耐風性は、一般に用いられている支柱を設置した場合でも、移植をしていないものと比較して顕著に小さくなり、本実験条件下では 1/2~1/3 になった。このような結果になった原因の一つとして、現状の支柱の部材固定方法や部材剛性などによるものと考えられる。しかしながら強風下での安全性を検討すると、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 以上の値(耐風性)が得られた。

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 4 年間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(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)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) G. J. Mayhead: Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies, Agricultural Meteorology, Vol.12, pp.123~130, 1973
- 2) 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:河川内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), 山海堂, 1994
- 3) 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号, 第2号, pp.105~112, 2007
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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

[2017 年 2 月 1 日原稿受理 2017 年 4 月 1 日採用決定]