

街路樹の引き倒し試験による倒木可能性の評価基準の検討

Examination of evaluation criteria for the possibility of fallen trees by pull-down test for roadside trees

石井 匡志* 吉岡 賢人**

Masashi ISHII* Kento YOSHIOKA**

Abstract: The purpose of this study was to verify the feasibility of formulating evaluation criteria based on the results of pull-down tests for actual street trees. Four Japanese pagoda trees (*Maackia amurensis*) planted in roadside in Tokyo were investigated. Three are damaged trees, another is a healthy tree. PiCUS TreeQinetic (manufactured by IML) was used for the measurement to determine the inclination angle and moment of the trunk. From the relationship between the root tilt angle and the moment, the damaged trees were suggested that tilts earlier as the moment increases. Two damaged trees were thought that there was a possibility that the trees would fall, because the wind speed obtained from the maximum moment of the damaged trees were smaller than the wind speed observed in the past 10 years. On the other hand, root-bearing capacity to withstand wind speed 30m was obtained even when the roots were damaged by Bekko-mushroom. Arbostat evaluated “Safety Factor < 1” for all target trees including healthy trees. From comparing the estimated wind speed calculated from the overturning load using the theory used in the arbostat and the moment measured in this test, different results were found. It was considered necessary to study the theory and calculation process used in arbostat and to examine the operation method in Japan.

Keywords: pull-down test, road side tree, Japanese pagoda trees, street tree diagnosis, fallen tree

キーワード: 引き倒し試験, 街路樹, エンジュ, 街路樹診断, 倒木

1. はじめに

台風や季節性の強風による街路樹の倒伏は、住民の生命や財産に被害を及ぼす可能性があり適切な管理と点検や診断により、未然に防止することが求められる。戦後から高度経済成長期、さらにはバブル経済期に植栽された街路樹は、植栽後 30 から 50 年以上を経過しており、幹や根に腐朽があるものが見られるようになってきた。東京都では 1998 年に街路樹診断が事業化され、1999 年に「街路樹診断マニュアル(案)」が試作された。¹⁾ また、2012 年には、国土交通省国土技術政策総合研究所により「街路樹の倒伏対策の手引き」²⁾ が出され、倒伏や落枝に関するデータが整理され、あわせて街路樹の診断方法が提案された。街路樹診断は国土交通省や東京都におけるマニュアル整備により、同じ課題を抱えている地方自治体に普及しはじめています。

街路樹診断の手順は、いずれのマニュアルにおいても、外観診断と機器診断があり、外観診断により幹や根株に腐朽空洞の被害があると認められる場合において機器診断により腐朽空洞の程度を評価することとされている。機器診断では、長さ 30~60 cm のキリを貫入してキリの先端にかかる抵抗値を見ることによる貫入抵抗測定が最も普及している。その他に、音波やガンマ線を用いて内部の腐朽空洞を測定する機器がある。

機器診断の結果、幹直径に対して健全材の厚みが約 16.6% 以下の場合、すなわち幹半径に対して約 33.3% 以下の場合に樹木が折損、倒伏する恐れがあるという報告³⁾に基づいて倒木危険性が判断される。幹半径に対して健全材の厚みが 33.3% 以下を腐朽空洞部が幹の面積に占める割合に換算すると約 45% となることから、腐朽空洞部の面積が 50% 以上となると倒木の可能性があるというのが判断のひとつの基準値となっている。実際の診断における最終判定では、腐朽部空洞部がある場合でも、梢端の枯れなどの生育障害がみられないか、根の状態やルートカラーが健全か、肥大生長がみられており回復の見込みがあるかなど、外観診断との総

合的な判定により伐採や剪定などの処置方法を決定する必要がある。総合的な判定においては診断者の経験が付加される点は診断精度向上における課題の一つである。また、倒木の可能性を判断する場合に考慮すべき項目として、風受け抵抗がある。樹形、樹高、葉の密度、土壌の深さ、根の張り具合、近接する同じ環境における倒木事例の有無などを考慮して、同じ状態の樹木の倒木可能性を評価しなければならぬ。ここでも診断者の経験が用いられる。

この風に対する樹木の抵抗性を評価する手法としては引き倒しによる評価方法がある。街路樹を対象に引き倒しを行った既往の研究として、小泉ら(2007)は、ニセアカシアの街路樹を対象に引き倒し試験を実施している⁴⁾。中村ら(2008)は3樹種を対象に引き倒し試験を実施し、引き倒し試験のデータ蓄積により根返り抵抗力の予測の可能性を指摘した⁵⁾。また、大塚ら(2022)は、ベッコウタケが確認されたニセアカシアを対象に引き倒し試験を実施し「子実体が継続して発生していた個体で、必ずしも根返り耐力が低下しているわけではなかった。一方で、はじめて子実体の発生が確認された個体でも、根返り耐力が大きく低下し倒伏危険性が增大している可能性があった⁶⁾」と報告した。そして、小泉(2022)は既往の研究を引用して「樹木を根系によって土壌に固定された片持ち梁とみなし、樹冠の風受け、樹幹に作用するモーメントによる幹折れ、および根元に作用するモーメントによる根返りに分けて、解析方法の概略⁷⁾」を述べている。その他に、街路樹のユリノキを対象として引き倒し試験を行い、根株腐朽の有無に関わらず根元周と最大モーメントの間に強い相関があるという報告がある⁸⁾。

引き倒し試験は対象樹木の耐風性を直接測定し評価することができる方法ではあるが、その測定事例は少なく、評価基準が定まっていない。そこで本研究では、実際の街路樹を対象に引き倒し試験を実施し、そのデータを基に引き倒し試験における評価基準策定の可能性について検証することを目的とした。

*アゴラ造園(株) 造園技術研究所

**株式会社吉岡緑地

*AGORA-ZOEN Technical research institute

**Yoshioka Ryokuchi Co.,LTD

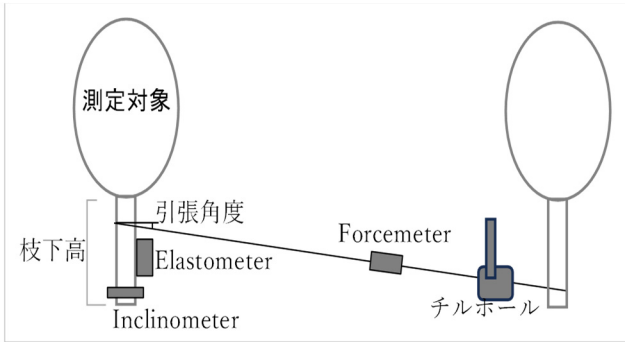


図-1 引き倒し試験の模式図

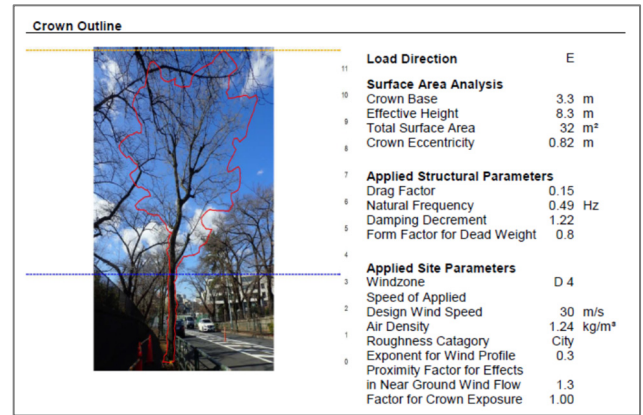


図-2 arbostat の各パラメータと樹冠トリミング処理の例

2. 調査の方法

(1) 調査対象樹木

調査対象は東京都道に植栽されているエンジュ (*Maackia amurensis*) 4本を対象とした。4本のうち3本は東京都街路樹診断マニュアルによる診断でC判定となり伐採予定の被害木である。残りの1本は対象区としての健全木である。引き倒し試験の実施時において、伐採予定の3本は事前の伐採により幹のみが残されており樹冠部は無かった。

(2) 使用機材と設置方法および測定項目

引き倒し試験の測定にはPiCUS TreeQinetic (IML社製)を用いた。同試験機は、Forcemeter(載荷計、以下Fm)、Inclinometer(傾斜計、以下Im)、Elastometer(伸縮計、以下Em)の3つのセンサーから構成されており、無線もしくは有線によって各センサーとPCをCommunication Unitを介して接続することで測定データを随時記録することができる。Fmはいわゆるロードセルであり引張荷重を、Imは荷重に伴う幹の傾斜角度を、Emは荷重に伴う幹の伸縮量をそれぞれ測定する。

計測機器の設置方法(図-1)は、まず荷重により折損の可能性が無い幹に荷重に耐えるロープを任意の高さで結束する。そのロープの反対の端とFmを専用シャックルにて取り付ける。さらにFmは隣接する樹木に設置したチルホールと連結する。次に幹折れが発生しそうな部位に専用のプラスチック製定規を用い200mm間隔で2本の釘を打ち込み、その釘を挟み込むようにしてEmを設置する。Emは引張方向に対して0°もしくは180°に設置する。Imは専用の金具を用いてルートカラー付近に打ち込み取り付け。Imは引張方向に対して90°もしくは270°の位置の地際部に取り付け、専用金具により水平にかつ、引張方向と並行になるようにとりつける。

以上の作業を完了したのち、PCから専用アプリケーションにて0キャリブレーション操作を行うことで各センサーの数値を0とし、Recボタンをクリックすることにより測定値の記録が始まる。それぞれのセンサーの測定値がFmで40kN、Emで100~200μm、Imで0.25°を超えないこととされており、いずれかの既定値を超える直前で測定終了とする。健全木は根元角度0.25°で測定終了し、その他の被害木はFmの値がピークを過ぎるまで引き倒した。

(3) 解析の方法

解析は以下に挙げる3種類の解析結果を比較することによりそれぞれの結果の妥当性を考察し、あわせて評価基準策定の可能性を検討した。

1) 根元の傾斜角度とモーメントの推移

得られた測定値から根元にかかるモーメントと根元の傾斜角度の関係をグラフ化し比較した。

2) モーメントに相当する風速の算出

引き倒し試験から得られた各対象木のモーメントの値を、小泉(2022)⁷⁾で挙げられている下式⁹⁾に代入して、得られたモーメントに相当する風速を求めた。

$$P_w = \frac{1}{2} C_d \rho A U^2$$

ここで、 P_w : 風荷重 (N)、 U : 風速 (m/s)、 C_d : 抗力係数、 ρ : 大気密度 (1.22kg/m³)、 A は樹冠の水平方向の投影面積 (m²) である。抗力係数 C_d は arbostat (詳細後述) と同じ値 0.15 とした。樹冠面積 A は調査対象とした健全木の樹冠を楕円、幹を長方形に近似することにより求め、樹冠が伐採されていた被害木にもその値を用いた。

3) arbostat による倒木危険度評価

PiCUS TreeQinetic 専用解析アプリケーションである arbostat にて倒木危険度を評価した。倒木危険度は、Im と Em の値に対してそれぞれ結果が得られるが、本稿では Im の結果のみを使用した。arbostat の使用にあたってはメーカー指定のトレーニングを受講したのちライセンス料の支払いが必要である。商用ライセンスの為、解析のための演算方法の詳細は明かされていないが、トレーニング時に使用される「MANUAL OF Tree STATICS and Tree Inspection」¹⁰⁾ にその理論が説明されており、原著はドイツ語で英訳版が発刊されている。

arbostat への入力(図-2)は、樹形に関する項目として樹高、幹周を入力する。樹木の全景写真を取り込み、写真上で樹木の外周をトリミングするとアプリケーションにより自動的に樹冠面積、枝下高、重心が計算される。次に、樹種を選択すると Structural Parameters として樹種特性に応じた Drag Factor (抗力係数: C_d)、Natural Frequency (固有振動) などの値が自動選択される。最後に Site Parameters として地表面粗度区分や基準風速を選択する。これらのパラメータは欧州の気候や樹木を基準として算出、標準化された値である。なお、樹形に関する項目の算出にあたっては、被害木に対しても健全木の全景写真を用いた。

3. 結果および考察

(1) 対象樹木

表-1 に引き倒し試験に用いた対象樹木の形状寸法とそこから計算した樹冠面積、重心高、および被害状況を示した。被害木の3本は事前に樹冠部が伐採されていた為、樹高、枝下高は健全木の値を用いたが幹径はそれぞれ実測値を用いたことにより、健全木に対して樹冠面積で-0.06から+0.03m²、重心高で-0.02から+0.14mの差があった。

(2) 根元の傾斜角度とモーメントの推移

被害木①は、16kNチルホールの最大けん引能力を超えたため

表-1 調査対象樹木の概要

個体名	樹高 (m)	枝下長 (m)	幹径 (m)	引張高 (m)	引張角度 (°)	植樹形状	樹冠面積 (m ²)	重心高 (m)	被害状況
被害木①	健全木の値を流用	健全木の値を流用	0.26	1.10	5.4	単独樹	31.67	7.12	根元に打音・鋼棒貫入異常あり
被害木②	健全木の値を流用	健全木の値を流用	0.21	1.00	4.7	単独樹	31.63	7.25	エンジュさび病
被害木③	健全木の値を流用	健全木の値を流用	0.31	1.00	2.6	単独樹	31.72	7.09	根元ベッコウタケあり
健全木	11.7	2.8	0.28	1.75	8.1	単独樹	31.69	7.11	

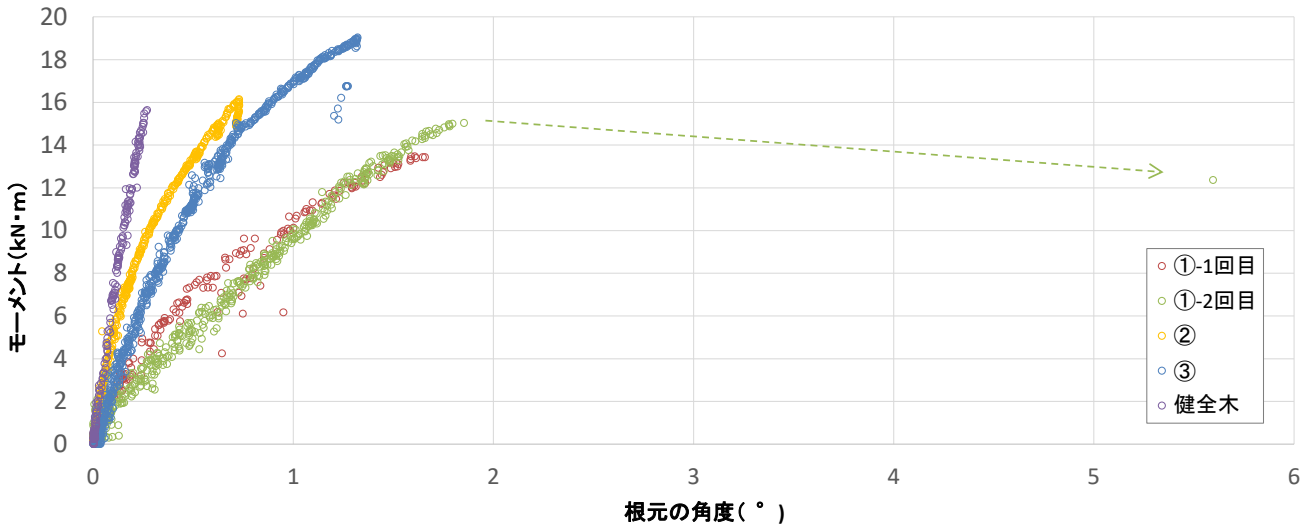


図-3 根元の傾斜角度とモーメントの推移

表-2 各モーメントの値と根元傾斜角度および推定風速

個体名	最大値			根元の傾斜角度 0.25°		
	モーメント (kN・m)	根元の傾斜角度 (°)	相当する推定風速 (m/s)	モーメント (kN・m)	モーメントの2.5倍値	モーメントの2.5倍に相当する推定風速 (m/s)
被害木①	15.04	1.853	27.00	3.59	8.97	20.86
被害木②	16.15	0.729	27.95	9.28	23.20	33.50
被害木③	19.05	1.321	30.42	6.50	16.25	28.10
健全木	—	—	—	15.64	39.10	43.56

最大けん引能力 20 kN のチェーンブロックに掛け替えて再度引張試験を実施した。根元の傾斜角度とモーメントの推移を図-3 に、モーメントの最大値とその時の根元の傾斜角度を表-2 に示す。被害木は Fm の値がピークを越えるまで、すなわち根の支持力の最大まで引き倒したが、健全木は根元角度 0.25° で試験を終了したため、モーメントの最大値は得られていない。打音異常や鋼棒貫入異常のある被害木①と根元にベッコウタケが確認された被害木③は、健全木に比べて傾きが小さくなる傾向が見られた。このことから根元に被害がある場合、モーメントの増加に対して早く傾倒すると示唆できる。

被害木 3 本のモーメントの最大値は 15.04 から 19.05 kN・m を示し、被害木は Fm の値がピークを過ぎるまで測定していること

らこのモーメントの最大値は根返り倒木や根元の折損が発生する値と考えられる。被害木②では根元の外観診断による被害は見られていないが、ベッコウタケのある被害木③よりモーメントの最大値は小さく、モーメント最大値時の根元の傾斜角度も小さかった。健全木では、被害木①や②と同程度のモーメントが発生しても、根返りに相当するモーメントの最大値には達しなかった。この結果はニセアカシアを対象として「子実体が継続して発生していた個体で、必ずしも根返り耐力が低下しているわけではなかった。一方で、はじめて子実体の発生が確認された個体でも、根返り耐力が大きく低下し倒伏危険性が增大している可能性があった」⁶⁾ とする大塚ら (2022) の指摘を支持する。

(3) モーメントの最大値に相当する風速の算出

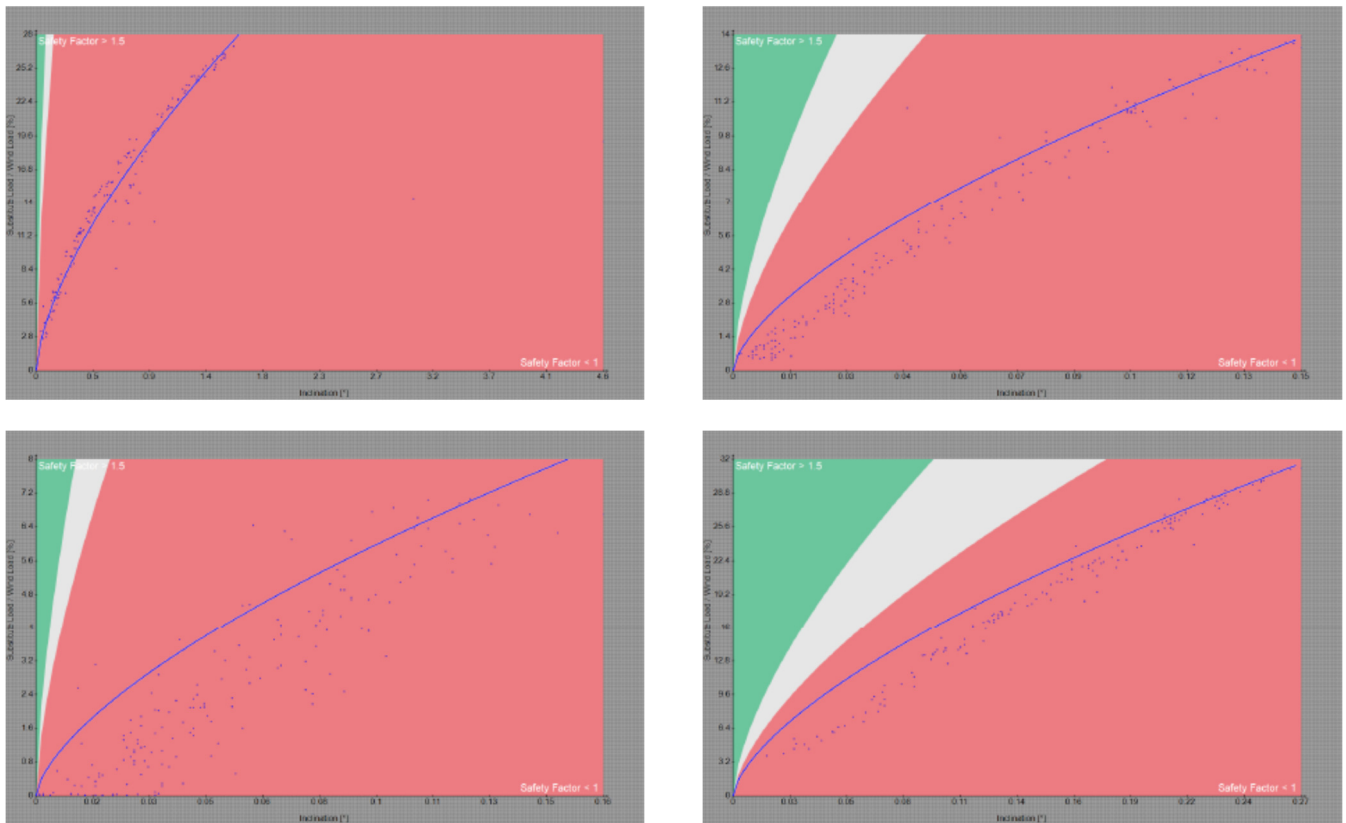


図-4 arbostat による評価 左上：被害木① 右上：被害木② 左下：被害木③ 右下：健全木
縦軸：Substitute Load/Wind Load (%) 横軸：Inclination (°)

表-2 にモーメントの最大値に相当する推定風速と健全木の調査終了時の根元傾斜角度である 0.25°の時のモーメントを示す。被害木について根返りに相当するモーメントの最大値から算出された推定風速は、被害木で 27.0 から 30.42 (m/s) となった。健全木における試験終了時の根元角度 0.25°と同角度における被害木のモーメントは最も大きい被害木②でも割合で 59.3%しかみられず、被害木①では 22.9%しか見られなかった。東京の瞬間最大風速は 2019 年に 41.5 (m/s)、過去 10 年間で被害木③の倒木が発生する可能性のある風速 28.1 (m/s) 以上を観測した年が 5 回記録されており被害木①、③は台風や季節性の強風により倒木する可能性があると考えられた。

(4) arbostat による評価

arbostat による評価図を図-4 に示す。図は、縦軸が Substitute Load/Wind Load (%), 横軸が Inclination (°) とされている。縦軸は、測定値から予測される抵抗力と、風速 30 (m/s) の風から受ける抵抗の割合を示していると考えられる。風速 30 (m/s) から受ける抵抗は、あらかじめ入力した Structural Parameter と Site Parameter (図-2) から算出されていると考えられ、各図中右下の赤色のエリアには「Safety Factor < 1」、左上の緑色のエリアには「Safety Factor > 1.5」とされている。また、「MANUAL OF Tree SRATICS and Tree Inspection」¹⁰⁾ では、根元の傾斜角度が 0.25°では転倒荷重の 40%の荷重がかかっているとみなせるとし、根の損傷の有無にかかわらず 2.5°で最大転倒荷重に達するとしている。このことは、根元傾斜角度 0.25°の 2.5 倍の荷重を計算することで、転倒荷重が計算できるということを意味し、この理論により倒木危険性の評価をしていると考えられる。

調査対象樹木は、arbostat による評価ではすべて Safety Factor が 1 未満と判定され、風速 30m/s の風によって倒木する危険があ

ると評価された。

(5) 根元角度 0.25° 時のモーメントの 2.5 倍に相当する風速

表-2 に、根元角度 0.25°の時のモーメントとその 2.5 倍の値を示し、2.5 倍に相当する推定風速の計算結果を示した。健全木の転倒荷重に相当する風速は 43.56 (m/s) と試算され、arbostat に入力した風速 30 (m/s) を上回ったが、その評価 (図-4 右下) では、Safety Factor < 1 であった。一方で、推定風速 43.56 (m/s) は過去 10 年間の東京の瞬間最大風速を上回っている。

被害木についても根元角度 0.25°のモーメントの 2.5 倍の値である転倒荷重から、そのモーメントに相当する風速を計算すると被害木①と被害木③では、モーメント最大値に相当する風速より小さい値 (表-2) となった。一方で被害木②では高い値となった。あわせて、被害木②の根元角度 0.25°のモーメントの 2.5 倍に相当する推定風速 33.5 (m/s) と計算されたが、arbostat のパラメーターは風速 30 (m/s) を上回っているにもかかわらず Safety Factor < 1 となっていた。これらのことから、既存の数式による風力換算のみでは arbostat による評価の妥当性の検証は難しいと考えられた。

4. 引き倒し試験の評価基準策定にむけた課題の整理

本試験から得られたデータを用いて、根元傾斜角度とモーメントの関係をグラフ化した結果、被害木ではモーメントの増加に対して早くに傾倒すると示唆された。これは、多くの引き倒し試験を繰り返すことで基準となる角度を導くことにより評価基準となりうると考えられた。

次に、被害木において根返りが発生すると考えられる荷重まで引き倒し、そのモーメントを既存の数式により風速に換算し、東京の過去 10 年の強風と比較した結果、被害木では倒木する可能性

があると推測できた。根元にベッコウタケなどの被害がある場合でも、一定程度の支持力が得られている場合があり、引き倒し試験による倒木危険度評価の有効性が示された。

arbostat による評価では健全木を含めたすべての対象樹木で Safety Factor < 1 と評価された。まずは、arbostat に用いられている理論や演算過程の研究が優先される。その上で、arbostat にあらかじめ用いられている各パラメーターが開発国由来の値となっていると考えられ日本における運用方法の検討が必要と考えられた。

arbostat で用いられていると考えられる理論を用いて、本試験で得られたデータから転倒荷重を計算し、既存の数式により推定風速を計算した結果、本試験で得られた最大モーメントに対して、相違点がみられた。arbostat の評価の妥当性については、その理論と演算過程の研究が優先されると改めて考えられた。

謝辞: 本試験を実施するにあたり東京都の街路樹を使用させていただきました。謝意を表します。

補注及び引用文献

- 1) 有賀一郎・大島渡・野上一志・秋元信二・大野集・高村 聡・永石憲道・山下得男・笠松滋久・神庭正則 (2020) : 都市樹木診断の成り立ちと近年の動向 (2) —街路樹診断の生い立ち—: 樹木医学研究 24(3), 164-165
- 2) 飯塚康雄・松江正彦 (2012) : 街路樹の倒伏の手引き: 国土技術政策総合研究所資料, 669
- 3) Mattheck C and Kubler H (1995) Wood—The internal optimization of trees, Springer, 129
- 4) 小泉章夫・平井卓郎・笠康三郎・新谷克教・清水英征 (2007) : 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 64 (2), 105-112
- 5) 中村哲世・小泉章夫・寺西真隆・池田啓輔 (2008) : 札幌市あいの里地区街路樹の耐風性試験: 樹木医学研究 12(4), 209-210
- 6) 大塚広介・生駒勇二・小泉章夫・佐々木義久・佐々木貴信 (2022) : ニセアカシアへのベッコウタケ腐朽の経年変化とその根返り耐力への影響: 北海道大学演習林研究報告, 72, 1-12
- 7) 小泉章夫 (2022) : 緑化樹の耐風性評価: 日本緑化工学会誌, 47 (3), 378-383
- 8) 石井匡志 (2015) : 都市における街路樹の持続的管理に関する技術学的研究, 千葉大学大学院園芸学研究科博士論文
- 9) 佐藤恵一・木村繁男・上野久儀・増山豊 (2004) : 流れ学: 朝倉書店, 216
- 10) Lothar Wessolly・Martin Erb 著・Karina Faust 訳 (2016) : MANUAL OF Tree STATICS and Tree Inspection, ISBN978-3-87617-143-2