

地盤強度と根の形状特性が樹木転倒限界に 与える影響について

EFFECTS OF SOIL SHEAR STRENGTH AND ROOT ARCHITECTURE ON MAXIMUM RESISTIVE BENDING MOMENT FOR OVERTURNING

田中規夫¹・八木澤順治²・Methsiri Samarakoon³・佐々木寧⁴・利根川誠⁵

Norio TANAKA, Junji YAGISAWA, Methsiri SAMARAKOON, Yasushi SASAKI and Makoto TONEGAWA

¹正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科・(兼)環境科学研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

²正会員 Ph.D 埼玉大学大学院助教 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³学生会員 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

⁴正会員 理博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

⁵非会員 国土交通省 荒川下流河川事務所 (〒115-0042 東京都北区志茂 5-41-1)

Tree pulling experiments that simulated flood action were conducted using *Salix babylonica* and *Juglans ailanthifolia*, exotic and invasive trees in Japanese rivers. The resulting damage was examined in order to assess the effects of physical tree characteristics and root architecture on the maximum resistive bending moment (M_{max}) for overturning. In situ soil shear strength tests were conducted in order to measure soil strength parameters. Significantly correlated ($p < 0.05$) non-linear relationships were found between M_{max} and tree characteristics, and $H \cdot D_{bh}^2$ provided the best predictor of the M_{max} within them. Non-linear models were fitted between M_{max} and D_{bh} for each species. The more efficient root architecture to withstand overturning is the heart-root system of *S. babylonica*, and the plate-root system of *J. ailanthifolia* is less efficient not with the same breast height diameter but with the same root volume. The average M_{max} of *S. babylonica* for overturning each species decreased linearly with increasing soil cohesion within the experimental range because root anchoring depth is restricted with increasing the soil cohesion.

Key Words : Tree pulling test, tree characteristics, root architecture, soil shear strength, maximum resistive bending moment

1. はじめに

近年、治水および河川環境の観点から河道内に過剰に繁茂する樹木群が問題となっており、本研究で対象とした荒川下流部の高水敷においても、風による転倒や洪水時における流木化が懸念される状態になりつつある。そのため、河道管理の観点から外力が発生した際に流木化する可能性の樹木を把握することが重要である。

河道内に繁茂した樹木に外力が作用した場合、その破壊形態は、倒伏や破断(主幹へのダメージ)、転倒に大別される^{1,2)}。この中で流木化する可能性のある破壊形態は転倒であり、その破壊要因がいくつか報告されている。大別すると、1)樹木の地上部特性(樹高、胸高直径、重量等)^{3,4,5)}、2)樹木の地下部特性(根鉢の深さや直径、根茎の構造)^{6,7)}、3)樹木繁茂地点の地盤強度⁸⁾が挙げられている。日本国内においても、渡辺ら⁹⁾が洪水時の状況を再現するため、地盤土壌の含水比を変化させた現地試験を実施している。

一方、「樹木管理の手引き(旧建設省)¹⁰⁾」では、日本全国

の河川での様々な樹種に対する引き倒し実験をもとに、樹木の転倒限界モーメントに関する平均値式と下限値式を提案している。ここで提案されている式は河川内の樹木管理の際に用いられることが多い。しかしながら、樹種による相違や地盤強度による相違については明確な傾向は見出されていない。

そこで、本研究では、荒川下流域の高水敷上に繁茂した樹木を対象とし、樹種(地上部・地下部特性)による相違、場所(地盤強度)による相違に注目して、樹木の引き倒し試験を行い、転倒限界モーメントに関する知見を深めるとともに、限界式の精度向上を図ることを目的とする。

2. 研究方法

(1) 試験対象地点および引き倒し試験概要

樹木の引き倒し試験は2009年8月に荒川下流域の高水敷上の異なる3地点に繁茂した樹木を対象として実施した(図-1)。対象樹種としてシダレヤナギ(3地点)およびオ

ニグルミ(2 地点)を選定し、それぞれ 17 本、6 本を試験対象木とした。また、樹木の生長段階によって転倒限界モーメント M_{max} が異なるため、両種の試験木の胸高直径 D_{bh} は 3 cm から 40 cm の広範囲で選定した。

引き倒し試験の方法は従来の方法¹⁰⁾と同様に、樹木の主幹部分に取り付けたワイヤーを重機に連結して引っ張ることで載荷した(図-2)。重機とワイヤーの間に取り付けたフォースゲージ(東京測器研究所: TLP-108)で引張り力を 1 秒間隔で測定し、データロガーに記録した。引き倒し試験を実施する際は、載荷点(ワイヤーを主幹に設置した位置)を試験木の根元から 1.2m の高さ(樹高の 10-30%)で固定した。また、載荷中の樹木の倒伏角度を把握するために、2 つの変位計を設置した(図-2)。変位計についてもフォースゲージと同様に、データロガーを用いて 1 秒間隔で変位を記録した。計測した引張力 F (kN) と変位は時間的に同期しており、これらのデータをもとに、以下の式を用いて樹木に作用する最大モーメント M_{max} (kNm) を算出した。

$$M_{max} = FL \sin \theta \quad (1)$$

ここに、 L は試験木の根元から載荷点までの高さ(本研究では 1.2m)、 θ は最大荷重が作用した時の樹木の倒伏角度(°)で 2 つの変位計から算出した。

(2) 試験対象木の繁茂特性の把握

従来の研究では転倒モーメント M_{max} は胸高直径の 2 乗で整理されている場合が多い。樹木の地上部および地下部特性を反映させた、より精度の高い式を明らかにするため、地上部特性として胸高直径 D_{bh} 、樹高 H を、地下部特性として根鉢深さ R_d 、根鉢半径 R_r を全ての試験木に対して調査した。 D_{bh} および H に関しては引き倒し試験後に現地で直接計測した。 R_d および R_r に関しては、引張試験によって転倒が確認された後に、根茎の破壊や根鉢の形状を保つように引き抜いた。引抜いた根茎部分をすべて大学に持ち帰り測定を行なった。本研究では R_d は根鉢内の根の平均長さとし、 R_r は樹幹の中心から根鉢の外縁までの長さを 4 箇所計測し、その平均とした。計測した地上部および地下部特性より、6 個の変数(D_{bh} 、 D_{bh}^2 、 H 、 $H \times D_{bh}^2$ (地上部の体積)、 R_d 、 R_r)を用いて、転倒モーメント M_{max} との相関解析を行なった。

(3) 試験対象地点における地盤強度の把握

地盤強度は引き倒し試験を実施した異なる 3 地点における代表地点でコアサンプリングを採取し、三軸試験を実施した。また、三軸試験のコアサンプリングを採取した地点近傍(かつすべての対象木付近)で一面せん断試験もあわせて実施した。一面せん断試験は図-3 に示すように、土壌表層を正方形ボックス(24 cm × 24 cm × 15 cm)がはめ込めるように成形し、上部に荷重をかけた状態で

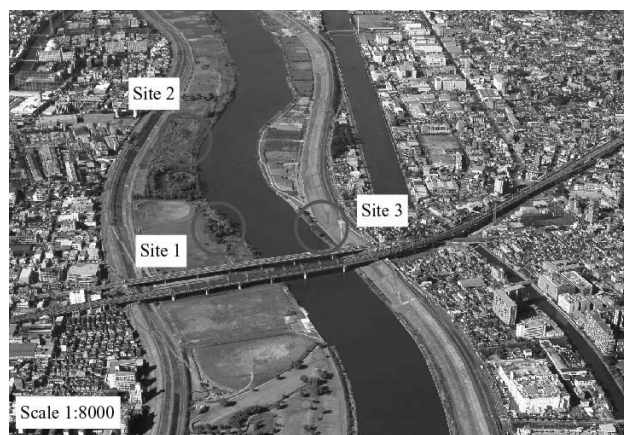


図-1 試験対象地点航空写真



図-2 試験装置概要

(L : 地表面から載荷点までの距離(m),

θ : 倒伏角(°), F : 荷重(kN))

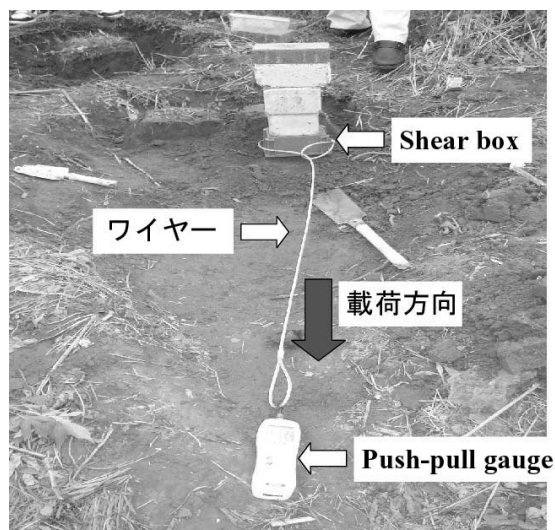


図-3 現地一面せん断試験の概要

ワイヤーを用いてボックスを水平方向に引っ張ることで載荷した。引張力は push-pull gauge(AIKOH Engineering, RX-100)を用いて、成形した土壌試料がせん断破壊を起こした時の最大引張力を記録した。一面せん断試験は乾燥状態(土壌含水率は 12-15%)で実施した。得られた最大引張力から内部摩擦角 ϕ (°)および粘着力 c (kN/m²)を算出し、三軸試験、一面せん断試験の ϕ および c を比較した。

3. 試験結果および考察

(1) 試験対象木の地上部・地下部特性

表-1 に引き倒し試験を実施したシダレヤナギ、オニグルミの地上部・地下部特性を示す。表-1 には両種の転倒限界モーメント M_{max} および転倒限界モーメント発生時の倒伏角度 θ もあわせて示した。両種の地上部の特性に注目すると、シダレヤナギの方がオニグルミに比べ樹高、胸高直径の平均値が大幅に上回っていた。また、樹冠幅・高さ・枝下高さもシダレヤナギの方がオニグルミよりも大きかった。このことから、地上部重量が大きく重心が高いシダレヤナギの方が転倒しやすい傾向が予想された。しかし、両種の転倒限界モーメント M_{max} と倒伏角度 θ の間に逆相関がみられた。これは、地上部が発達しているシダレヤナギの方が主幹が太く、オニグルミに比べて倒伏しづらかったためと考えられる。

一方、地下部に関しても両種に大きな相違があった。図-4 に示すように、シダレヤナギは水平方向、斜め方向、鉛直方向に主根が発達し、さらに主根から多くの根が延伸していた(以後、深根型¹¹⁾)。それに対して、オニグルミは水平方向に数本の主根が伸びているものの、シダレヤナギのように主根から派生する根はほとんど確認されなかった(以後、浅根型¹¹⁾)。このような根茎形態の違いから、両種の根鉢深さ R_d 、根鉢直径 R_r は表-1 に示すように大きな差が見られた。

(2) 試験対象地点における地盤強度

表-2 に一面せん断試験および三軸試験より得られた試験地点の土壌の粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ を示した。両者の c および ϕ は Site 1, Site 2 とともに差が大きかった。この原因として、両試験を実施した位置が完全に一致していないことや、三軸試験は表層から 1m 深さまでのサンプリング試料を用いているのに対し、一面せん断試験は表層から 15 cm 程度の試料を用いていることなどが考えられる。現地で簡易に得られる情報から転倒限界モーメントを推定することが重要であり、また一面せん断試験の方が試験木の根茎により近い位置で実施していたことから、本研究では一面せん断試験により得られた地盤強度を用いて検討を行なうこととした。

(3) 対象試験木の地上部・地下部特性による転倒限界モーメント M_{max} の変化

図-5 にシダレヤナギおよびオニグルミの D_{bh} と M_{max} の関係を示す。ここでは、異なる 3 地点(Site 1- Site 3)の試験木を区別して示している。この図より、胸高直径が同等の樹木でも試験地が異なると M_{max} に大きな差があることがわかる。このことは、 M_{max} が地盤強度によって大きく変化する可能性を意味している(図-7 で後述する)。

表-3, 表-4 はそれぞれシダレヤナギ、オニグルミの

表-1 試験木の地上部・地下部特性

パラメータ	記号	単位	樹種	
			シダレヤナギ 17 本	オニグルミ 6 本
樹高	H	m	9.5 (2.2)	6.3 (1.7)
胸高直径	D_{bh}	m	23.7 (9.6)	11.0 (5.5)
樹冠幅	C_w	m	7.0 (2.0)	6.3 (1.6)
樹冠高さ	C_h	m	7.0 (1.7)	4.5 (1.5)
枝下高	B_h	m	2.5 (0.7)	1.8 (0.5)
根鉢深さ	R_d	m	0.9 (0.2)	0.7 (0.1)
根鉢半径	R_r	m	1.6 (0.6)	1.4 (0.5)
平均転倒限界モーメント	M_{max}	kNm	53.0 (41.5)	17.0 (13.9)
平均倒伏角	θ	°	12.7 (8.5)	23.0 (17.2)



図-4 対象樹種の根鉢形状の特性

((a) シダレヤナギ (深根型),
(b) オニグルミ (浅根型))

表-2 一面せん断試験と三軸試験による地盤強度の比較

試験の種類および変数		Site 1	Site 2
一面せん断試験	粘着力 c (kN/m ²)	1.3	3.2
	内部摩擦角 ϕ (°)	60.9	35.0
三軸試験	粘着力 c (kN/m ²)	21.2	12.3
	内部摩擦角 ϕ (°)	32.8	36.1

M_{max} と地上部・地下部特性から得られる 6 つの変数との相関を示している。なお、この検討においては、前述のように、地盤強度の異なる試験地のデータを含めて検討することが難しいため、Site 1 の試験対象木のみに限定している。表-3, 表-4 より、 M_{max} と検討対象とした 6 つのパラメータとの間に相関関係があることがわかる(有意水準 $p < 0.05$)。特に、 $H \times D_{bh}^2$ (地上部の体積に相当)が M_{max} を適切に評価する指標であることがわかる。しかしながら、

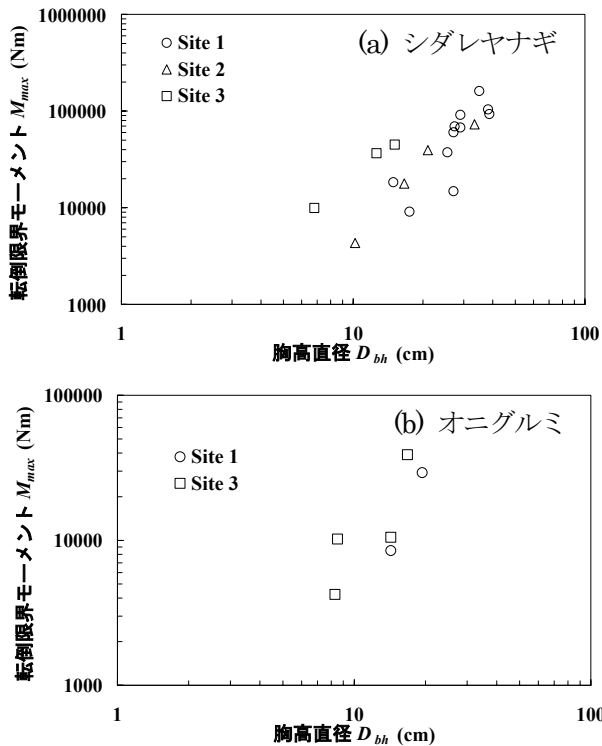


図-5 胸高直径と転倒限界モーメントの関係
(a) シダレヤナギ, (b) オニグルミ

従来から用いられることが多い D_{bh}^2 も M_{max} との高い決定係数を有していた。また、もう一つの地上部特性である樹高 H は、特にシダレヤナギに関して、 M_{max} や他の地上部・地下部特性と相関が低いことがわかる。

一方、地下部特性である根鉢深さ R_d と転倒限界モーメント M_{max} との関係に着目すると、シダレヤナギに関しては相関が低く($R^2=0.06$)、オニグルミに関しては相関が高かった($R^2=0.71$)。それに対して、根鉢半径 R_r と M_{max} との関係についてみてみると、逆にオニグルミに関しては相関が低く($R^2=0.24$)、シダレヤナギに関しては比較的高い相関であった($R^2=0.51$)。また、地上部・地下部の特性同士の相関に着目すると、シダレヤナギの根鉢深さ R_d 、オニグルミの根鉢半径 R_r を除いて、互いに高い相関を示していることがわかる。

表-3および表-4より、選定した地上部・地下部の変数のうち、 $H \times D_{bh}^2$ が M_{max} を最も精度良く推定できることがわかった。そこで、 M_{max} の推定式を作成したところ、シダレヤナギ(式(2))、オニグルミ(式(3))についてそれぞれ以下のような式が得られた。

$$M_{max} = 0.56(H \times D_{bh}^2)^{1.23} \quad (2)$$

$$M_{max} = 0.42(H \times D_{bh}^2)^{0.89} \quad (3)$$

ここに、 M_{max} はNm単位で算出され、 H および D_{bh} はcm単位で代入するように係数および乗数を定めた。一方、既往研究においては、旧建設省が全国で実施した樹木引

表-3 シダレヤナギの地上部・地下部特性と M_{max} との決定係数

	M_{max}	D_{bh}	D_{bh}^2	H	$H \times D_{bh}^2$	R_d	R_r
M_{max}	1	—	—	—	—	—	—
D_{bh}	0.70	1	—	—	—	—	—
D_{bh}^2	0.70	1	1	—	—	—	—
H	0.61	0.29	0.29	1	—	—	—
$H \times D_{bh}^2$	0.83	0.94	0.94	0.54	1	—	—
R_d	0.06	0.01	0.01	0.39	0.07	1	—
R_r	0.51	0.88	0.88	0.17	0.78	0.002	1

表-4 オニグルミの地上部・地下部特性と M_{max} との決定係数

	M_{max}	D_{bh}	D_{bh}^2	H	$H \times D_{bh}^2$	R_d	R_r
M_{max}	1	—	—	—	—	—	—
D_{bh}	0.66	1	—	—	—	—	—
D_{bh}^2	0.66	1	1	—	—	—	—
H	0.83	0.8	0.8	1	—	—	—
$H \times D_{bh}^2$	0.84	0.99	0.99	0.86	1	—	—
R_d	0.71	0.89	0.89	0.62	0.86	1	—
R_r	0.24	0.001	0.001	0.22	0.01	0.003	1

表-5 両種の転倒限界モーメント平均式の決定係数

地点	樹種	
	シダレヤナギ	オニグルミ
Site 1	0.52	0.43
Site 2	0.87	—
Site 3	0.97	0.64

き倒し試験結果から得た M_{max} と D_{bh}^2 との関係式(平均式と下限式)が提案されている¹⁰⁾。その関係式の式形は $M_{max}=\alpha D_{bh}^2$ であり、平均式の場合 α は76.4、下限式の場合は24.5と提案されている(M_{max} はNm単位で算出され、 D_{bh} はcm単位で代入する)。ここでは、その係数値との比較を行なうため、本研究で得られた両種の係数値 α を把握したところ、シダレヤナギの場合、平均式および下限式の係数はそれぞれ87.59、28.2であった。一方、オニグルミの場合はそれぞれ85.61、44.5であった。

得られた転倒限界モーメントの平均式と各試験地点で得られた実験データとの相関を調べたところ、決定係数は表-5に示すようになった。樹種や試験地点によって差はあるものの、概ね高い決定係数であった。このことから、得られた平均式を用いてそれぞれの樹種の転倒限界モーメントを把握することができると考えられる。平均式において両種の係数 α はほぼ同等の値であり、両種の胸高直径が同等であれば同等の転倒限界モーメントであることを意味している。しかしながら、シダレヤナギ(深根型)とオニグルミ(浅根型)は異なる根鉢形状であるため、本来は同等の胸高直径であっても異なる転倒限界モーメントになると考えられる。そこで、同等の胸高直径の地上部重量(S)と地下部重量(R)の比(R/S)を比較したところ、オニグルミはシダレヤナギと比較して大きな値であった(オニグルミ($D_{bh}=10.3$ cm)、シダレヤナギ

表-6 異なる3地点の地盤強度および根鉢深さと平均転倒限界モーメントの比較

パラメータ	樹種	記号	単位	試験地点		
				Site 1	Site 2	Site 3
粘着力	—	c	kN/m^2	1.3	3.2	2.7
内部摩擦角	—	φ	$^{\circ}$	60.9	35.0	39.6
平均転倒限界モーメント	シダレヤナギ	M_{max}	kNm	66.1	20.5	30.5
	オニグルミ			18.9	—	16.0
平均根鉢深さ	シダレヤナギ	R_d	m	99.4	71.7	74.0
	オニグルミ			68.0	—	63.5

($D_{bh}=10.2\text{ cm}$)の R/S はそれぞれ 0.19, 0.05)。従って、根鉢形状の違いが転倒限界モーメントに与える影響を確認するために、転倒限界モーメントと根鉢体積と根鉢の表面積との関係を検討した(図-6)。図-6 から、根鉢の体積、表面積によって両種の転倒限界モーメントが大きく異なっており、同等の根鉢体積、表面積であれば、シダレヤナギの方がオニグルミよりも大きな転倒限界モーメントを示すことがわかる。さらに、より大きな根鉢になれば両種の転倒限界モーメントの差も大きくなることがわかる。同等の胸高直径ではオニグルミが地下部を発達させていたために、結果として浅根型(オニグルミ)と深根型(シダレヤナギ)の転倒限界式(平均)の係数が同等の値となったと考えられる。

本研究では、深根型と浅根型の二つの根茎構造を有する樹種を対象とした。深根型の根茎構造は転倒に対して耐性が強く、浅根型は耐性が弱かった。既往研究でも同様の指摘がなされており、深根型は根によるアンカリング効果が大きいことが報告されている^{12, 13)}。また、深根型の根茎は主根から多くの細かい根を発達させるため、地上部が外力(洪水や強風等)を受け、根茎が持ち上げられたとしても、根茎と一体化した土塊の重量が転倒に対して抵抗として働くことも報告されている¹⁴⁾。

(4) 地盤強度が転倒限界モーメント M_{max} に与える影響

地盤のせん断強度は根張りの度合いを決める重要な要因の一つである。地盤のせん断強度はMohr-Coulomb式で示される粘着力 c と内部摩擦角 φ によって決定される。表-6に各試験地点における粘着力、内部摩擦角の平均値、それぞれの樹種の転倒限界モーメント、根鉢深さの平均値をまとめた。この表より、地盤土壌の粘着性が、異なる樹種・試験地点の試験木の根鉢の大きさと転倒限界モーメントに与える影響を把握した。その結果、両種に共通して、粘着力 c が増加すると根鉢深さが減少する傾向にあった。図-7はシダレヤナギに関して、各試験地点における粘着力 c と転倒限界モーメントの平均値の関係を示している(オニグルミは2地点なので検討対象外とした)。胸高直径が15cmで区別すると、 M_{max} と c の間に以下の関係式が得られた。

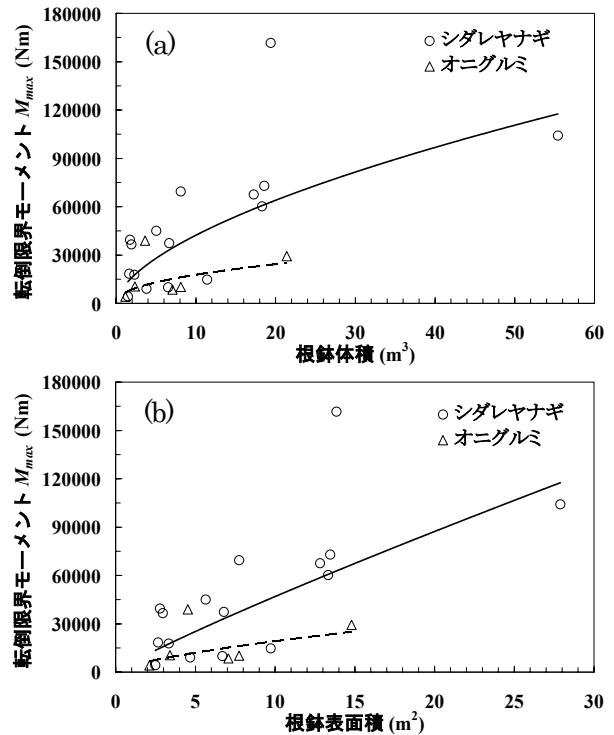


図-6 対象樹種の地下部特性と転倒限界モーメントの関係
(a) 根鉢体積, (b) 根鉢表面積, 図中の実線, 破線はそれぞれシダレヤナギ, オニグルミの近似曲線を示す

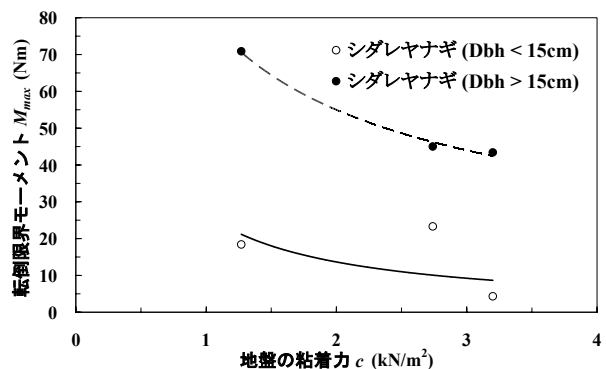


図-7 地盤の粘着力による転倒限界モーメントの変化

$$M_{max} = 26.7c^{-0.97} \quad (\text{シダレヤナギ: } D_{bh} < 15\text{ cm}) \quad (4)$$

$$M_{max} = 80.5c^{-0.55} \quad (\text{シダレヤナギ: } D_{bh} > 15\text{ cm}) \quad (5)$$

図-7や式(4)-(5)の乗数を比較すると、地盤土壌の粘着力 c の増加とともに転倒限界モーメントの平均値が減少して

いることがわかる。

本研究の結果、地盤土壌の粘着力が増加すると同じ樹種の転倒限界モーメントの平均値が減少する傾向が見出された。このことは、樹木の生長(根茎の生長のしやすさ)と関係があると考えられる。樹木の成長に重要な要因は水や栄養塩の吸収のため根茎が発達することである。その際、地盤強度が高い場所であると、根が伸ばしづらくなり根茎の拡大が抑制されることが報告されている¹⁵⁾。また、Kirby and Bengough¹⁶⁾は圧密を受けた地盤における根は、根茎を広範囲に拡大させるよりも、根自体を太くする傾向があることを報告している。これらの報告にあるように、地盤強度が小さい場所では根茎は広範囲に拡大するが、地盤強度が大きい場所では、根茎は広範囲に拡大せずに、地盤の表層付近にしか発達できない。通常、根鉢のサイズは根の長さによって決まるため、根を広範囲に発達させた樹木は根鉢のサイズが大きくなると考えられる。本研究で対象にした樹木においても、地盤の粘着力が大きくなるにつれて根鉢深さが浅くなっていると同時に転倒限界モーメントも小さくなっていた(表-6、図-7)。以上より、樹木の転倒限界モーメントをより精度良く把握するためには、地上部の特性のみならず、地下部の特性(根茎の構造)に影響を及ぼす地盤強度を把握することが重要である。

4. 結論

本研究では、樹種による相違、場所(地盤強度)による相違に注目して、樹木の引き倒し試験を行なった。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① $H \times D_{bh}^2$ (地上部の体積に相当) が転倒限界モーメント M_{max} を精度良く表現するパラメータであることを明らかにした。
- ② 根茎構造(浅根型、深根型)の相違による根鉢のサイズ(根鉢の表面積および体積)が転倒限界モーメントに大きく影響していることが示唆された。
- ③ 転倒限界モーメントには地盤の粘着性が大きな影響を与えることが明らかになった。本研究で対象とした地点では、地盤の粘着力の増加とともに、シダレヤナギの転倒限界モーメントが減少した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、平成20年度河川整備基金・助成事業(代表：佐々木寧)、科学研究費補助金・特別研究員奨励費(助成番号 P 09081)および科学研究費補助金(助成番号 21860013)の一部を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 砂田憲吾, 河野逸朗, 田中総介: 出水時における河道内樹木の破壊規模の予測に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第46

巻, pp.947-952, 2002.

- 2) Tanaka N. and Yagisawa J. : Effects of tree characteristics and substrate condition on critical breaking moment of trees due to heavy flooding, *Landscape Ecol. Eng.*, 5, pp.59-70, 2009.
- 3) Moore J. R. : Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. *For. Ecol. Management*, 135, pp.63-71, 2000.
- 4) Peltola H., Kellomaki S., Hassinen A. and Granander M. : Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland, *For. Ecol. Management*, 135, pp.143-153, 2000.
- 5) Achim A., Ruel J. C., Gardiner B. A., Laflamme G. and Meunier S. : Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage, *For. Ecol. Management*, 204, pp.35-50, 2005.
- 6) Fourcaud T., Ji J. N., Zhang Z. Q. and Stokes A. : Understanding the impact of root morphology on over- turning mechanism: a modeling approach, *Annals of Botany*, 101, pp.1267-1280, 2008.
- 7) Coutts M. P. : Components of tree stability in Sitka Spruce on peaty gley soil, *Forestry*, 59, pp.173-197, 1986.
- 8) Dupuy L., Fourcaud T. and Stokes A. : A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage, *Plant and Soil*, 278, pp.119-134, 2005.
- 9) 渡邊康玄, 市川嘉輝, 井手康郎: 洪水時における河道内樹木の倒伏限界, 水工学論文集, 第40巻, pp.53-58, 1996.
- 10) (財)リバーフロント整備センター編: 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp.147-171, 1994.
- 11) 刘住昇: 樹木根系図説, 誠文堂新光社, 1987.
- 12) Stokes A., Salin F., Kokutse A. D., Berthier S., Jeannin H., Mochan S., Kokutse N., Dorren L., Ghani M. A. and Fourcaud T. : Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps, *Plant Soil*, 278, pp.107-117, 2005.
- 13) Wu T. H., Ombler R. M., Erb R. T. and Beal P. E. : Study of soil-root interaction, *J. Geotech. Eng. ASCE*, 114, pp.1351-1375, 1988.
- 14) Stokes A. and Mattheck C. : Variation of wood strength in roots of forest trees, *J. Exp. Bot.*, 47, pp.693-699, 1996.
- 15) Clark L. J., Whalley W. R. and Barraclough P. B. : How do roots penetrate strong soil?, *Plant and Soil*, 255, pp.93-104, 2003.
- 16) Kirby J. M. and Bengough A. G. : Influence of soil strength on root growth: experiments and analysis using a critical-state model, *Eur. J. Soil Sci.*, 53, pp.119-128, 2002.

(2010.4.8 受付)