

平成 23 年 6 月 10 日現在

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860013

研究課題名（和文）水害防備林の氾濫流制御効果と適用限界に関する研究

研究課題名（英文）Effect of flood defence trees on control of overflow and its threshold breaking condition.

研究代表者

八木澤 順治 (Yagisawa Junji)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70549998

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では水害防備林の設置効果と適用限界を明らかにするという視点に立ち、まず、水害防備林の密度による抗力特性・底面せん断力の変化を、越水を想定した様々な水理条件下で明らかにすることを目的として、当該年度は越流部(堤防モデルの裏法面)に配置した植生モデルの抵抗特性、底面せん断力特性の把握(堤防法面の侵食を想定しない固定床での水理模型実験により行なう)を行なった。具体的には、密度による効果として植物モデルの空隙率を変化させ、3 パターンの越流水深における底面せん断力の変化を把握した。その結果、空隙率が小さい(密に繁茂した状態)の方が、法面のせん断力を減少させるものの、法尻付近のせん断力を増加させることがわかった。このことより、法面に植物を配置する際、法面の洗掘防止だけではなく法尻付近の局所的な洗掘に対する影響も考慮する必要があることを示した。また、堤防の裏法面に設置した樹木を想定した破壊限界を把握するため、高水敷上において樹木引き倒し破壊試験を実施した。その結果、転倒限界モーメントは樹木の根茎構造(本研究では深根型と浅根型)のうち、特に根鉢の表面積および体積が大きく影響していることがわかった。さらに、地盤の粘着性も転倒限界モーメントに大きな影響を与えることがわかった。本研究で対象とした地点では、地盤の粘着性の増加とともに、転倒限界モーメントが減少した。法面に設置された水害防備林の設置による利点(せん断力の減少)のみならず、樹木の破壊限界を把握することで、適用限界までを含めて評価することが可能となった。

## 研究成果の概要（英文）：

The research was conducted to elucidate the effect of shear stress reduction due to plant and its breaking condition. Firstly, flume experiments were conducted. Porosities of vegetation model were selected 80% and 95%. In these experiments, water depth, velocity and drag force acting on vegetation model were measured. By using obtained experimental data, shear stress acting on slope of embankment model was calculated. Shear stress on slope of embankment model decreased with decreasing porosity. However, when porosity of vegetation model is small (85% porosity case), shear stress at rear side of vegetation model increased drastically. This indicates that to maintain the porosity of vegetation is very important for preventing the levee erosion.

On the other hand, for elucidating breaking condition for real tree, 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  $H^*D_{bh}^2$  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.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：水工水理学

科研費の分科・細目：研究活動スタート支援

キーワード：堤防，越流，底面せん断力，水害防備林，破壊限界，抗力モーメント

### 1. 研究開始当初の背景

近年の防災施策において「減災」という考え方が重視されており，災害の発生を未然に防ぐという視点のみならず災害に対してしなやかに対応し，生じる被害を最小化するという視点に立った対策が必要である．また，地球温暖化に伴う気候変動によって河川流量の増大も懸念されており，河川においても減災の考え方がますます重要性を増してくるものと考えられる．治水対策は通常，設定された超過確率の洪水に対応した計画に基づいて進められているが，同時に，計画規模以上の洪水が発生した場合に想定される事態に対しての備えが極めて重要である．

樹林帯の流速低減効果は河川や風倒木(特に斜面林)について多く研究があるものの，越水を防御するという視点での樹林帯の配置方法や樹種の選定，樹木の破壊限界については研究事例が少ないのが現状である．また，越水や破堤後の減災を目的とした樹林帯に関しては，以前から水害防備林，防災樹林帯という形で，その重要性が指摘されているが，堤防形状等の土地条件によって適切な樹林構造は選定されておらず，また，樹林帯自身が破壊による流失をうける可能性があるなど，複雑な状況を想定した研究は皆無であった．申請者はこれまで，樹林構造(繁茂密度や樹形)の相違が抗力特性に及ぼす影響，河道内(特に砂礫州上)に繁茂した樹木の洪水による破壊条件について研究を行ってきた．その中で，樹林帯背後の流速低減効果には樹林帯の密度や樹形(異なる種を混在させた鉛直構造の違いも含む)によって大きく変化するこ

とが明らかにされている．一方，樹林帯の流失には樹木に作用する抗力のみならず，生育基盤の洗掘(底面せん断力に関係)が重要であることがわかっているものの，通常の河川流とは異なる条件下における樹木の抗力特性，底面せん断力の変化に関しては未知な点が多い．これらの課題を踏まえた上で，水害防備林の整備に資するためには，様々な形状(基準断面，法面勾配等)の堤防に対して，氾濫流量の減少・流体力の減少に及ぼす樹木群の効果と適用限界を明らかにする必要があるという着想に至った．

### 2. 研究の目的

本研究では，水害防備林の設置効果と適用限界を明らかにするという視点に立ち，まず，水害防備林の密度による抗力特性・底面せん断力の変化を，越水を想定した様々な水理条件下で明らかにする．さらに，水害防備林自体の破壊限界(樹木地上部の破断・倒伏や流失)を考慮した形で一般化することで，水害防備林の整備計画に資することを目的とするものである．

### 3. 研究の方法

本研究では主に以下の2項目について検討を実施した．

#### (1) 水害防備林を想定した水理模型実験

水害防備林の密度による抗力特性・底面せん断力の変化を，越水を想定した様々な水理条件下で明らかにするため，長方形断面水路(幅0.7m,高さ0.5m,長さ5m)に図1に示すような堤体模型を設置して実験を行なった．

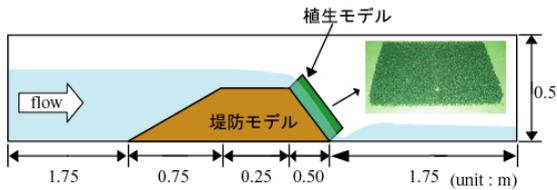


図 1 水路の概要図(縦断面図)および植生モデル

表 1 実験ケース一覧

空隙率	流量 (m <sup>3</sup> /min)				裏法面の平均フルード数
	0.44	0.55	0.74	0.88	
100% (植生なし)	0.44	0.55	0.74	0.88	3.3
80%	0.44	0.55	0.74	-	0.5
95%	-	0.55	0.74	0.88	0.9

植生モデル(図 1 右上)は、空隙率 80%、95%のタイプを用意し、堤体模型の裏法面全体を覆うように設置した。それぞれの植生モデルにつき 3 ケースの流量で通水実験を行い、水面形、流速および植生モデルに作用する抗力の測定を実施した。なお、各実験における裏法面での平均的なフルード数は表 1 に示すように、植生なしのケースでは射流、空隙率 80%、95%のケースでは常流の条件で実施した。実験によって求めた水深  $h$ (m)、植生モデルに作用する抗力  $F$ (N)から、以下に示す式(1)-(3)より底面せん断力を算出した。 $\tau_w$ を流体塊に作用する重力の斜面方向成分(N/m<sup>2</sup>)、 $\tau_v$ を植生による抗力(N/m<sup>2</sup>)とした時、底面せん断力(N/m<sup>2</sup>)  $\tau_b$ を以下の式で評価した。

$$\tau_b = \tau_w - \tau_v \quad (1)$$

$$\tau_w = m_1 g i \quad (2)$$

$$m_1 = \rho(h - \lambda h) \quad (3)$$

$m_1$  は植生の密度を考慮した場合の流体塊の重さ(kg)、 $g$  は重力加速項(m/s<sup>2</sup>)、 $i$  はエネルギー勾配、 $\rho$  は水の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $\lambda$  は植生模型の密度である。今回の実験では、植生が抽水状態となることを想定した。

#### (2) 水害防備林の破壊限界に関する現地実験

水害防備林自体の破壊限界を明らかにするため、樹木の引き倒し試験を実施した。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 2)。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:

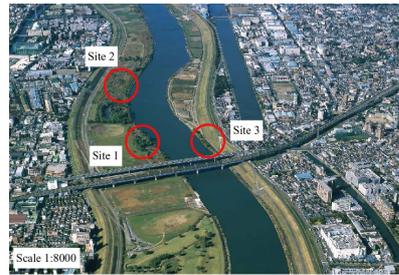


図 1 試験対象地点航空写真



図 2 試験装置概要

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。

#### 4. 研究成果

##### (1) 水害防備林の底面せん断力低減効果

図 3 は、植生モデルを配置した裏法面におけるせん断力の平均値を示している。この図では、本研究で実験を実施した異なる空隙率ごとのせん断力の変化がわかるが、流量の変化に対するせん断力の変化はどの空隙率においてもほぼかわらない結果となった。一方、同様の流量の場合、空隙率が低い(密生した)植生モデルの方が、せん断力を低減することが分かる。図 4 は、流れが植生モデルを抜けた直後の法尻部分におけるせん断力の平均値を示す。法尻部分では、同様の流量の場合、植生モデルの空隙率が低い(密生している)ほど、せん断力が大幅に増加することが分かる。空隙率が 80%の植生モデルの場合、95%の植生モデルを用いたときよりも、約 3-5 倍程度のせん断力が法尻付近に作用することがわかる。また、空隙率が 80%の植生モデルを用いた場合の法尻付近のせん断力は、植生が無い場合における法尻付近のせん断力に比べると、8-10 倍程度になった。図 5 には、裏法面の平均的なせん断力( $\tau_1$ )と法尻部分におけるせん断力( $\tau_2$ )との比を示した。空隙率 80%の植生モデルを用いた場合、流れが法面から法尻に移行する際に、急激にせん断力が増加

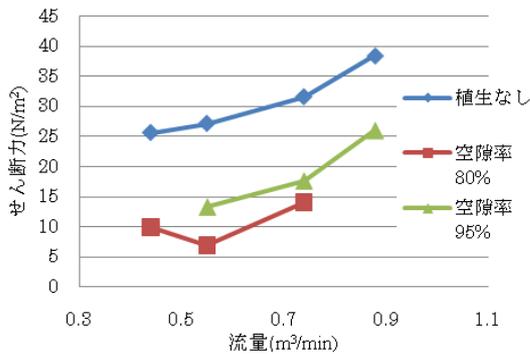


図3 植生モデルを配置した裏法面に

おけるせん断力の平均値

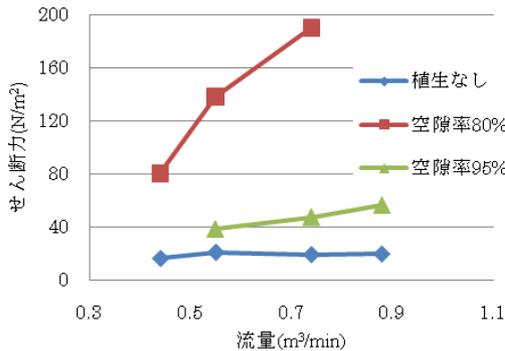


図4 法尻部分におけるせん断力の平均値

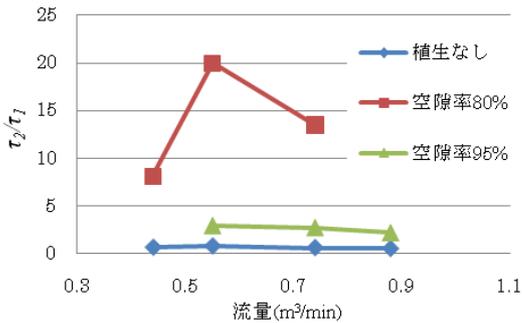


図5 裏法面の平均的なせん断力 $\tau_1$ と

法尻部分におけるせん断力 $\tau_2$ との比

していることが分かる。これは、空隙率 80% の植生モデルの場合、法尻付近においてエネルギー勾配が他の空隙率の場合に比べ大きくなるためだと考えられる。密生した空隙率が 80% のモデルの場合、流積が減少し裏法面において水位が上昇する。また、法尻付近において植生モデルがなくなることによって水位が急激に低下するため、エネルギー勾配が大きくなるためせん断力も大きくなったと考えられる。空隙率が 95% (密度が小さい) の場合、80% のケースと比較すると、前述したような植生モデル内での水位の堰上げや法尻付近での急激な水位低下は確認されなかった。そのため、図-6 からわかるように、裏法面のせん断力( $\tau_1$ )に対して法尻のせん断力( $\tau_2$ )は、空隙率が 80% のときと比較して著しく増加することはなく、約 2-2.5 倍程度となった。植生がない場合では、裏法面のせん断力と法尻部分のせん断力の違いは、いずれの流量においても顕著に認められなかった。

## (2) 水害防備林の破壊限界

表 2、表 3 はそれぞれシダレヤナギ、オニグルミの  $M_{max}$  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、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 の試験対象木だけに限定している。表 2、表 3 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、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 ( $R^2 = 0.51$ )。表-2 および表-3 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(4))、オニグルミ(式(5))についてそれぞれ以下のような式が得られた。

$$M_{max} = 0.56(H \times D_{bh}^2)^{0.23} \quad (4)$$

$$M_{max} = 0.42(H \times D_{bh}^2)^{0.89} \quad (5)$$

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、

表 2 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 3 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

旧建設省が全国で実施した樹木引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。その関係式の式形は  $M_{max}=\alpha D_{bh}^2$  であり, 平均式の場合  $\alpha$  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  $\alpha$  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 4 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  $\alpha$  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

表 4 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

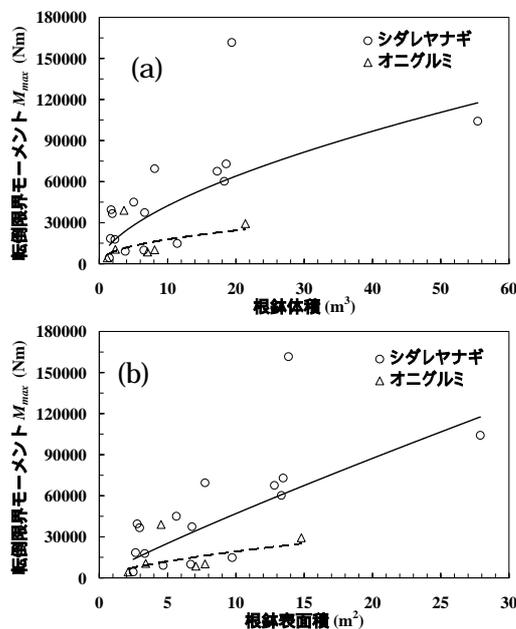


図 7 対象樹種の地下部特性と転倒限界モーメントの関係 ((a)根鉢体積, (b) 根鉢表面積, 図中の実線, 破線はそれぞれシダレヤナギ, オニグルミの近似曲線を示す

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( $D_{bh}=10.2$  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。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。

また, 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  $\phi$  によって決定される。表 5 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, シダレヤナギの  $M_{max}$  と  $c$  の間に以下の関係式が得られた。

$$M_{max} = 26.7c^{-0.97} (D_{bh} < 15 \text{ cm}) \quad (6)$$

$$M_{max} = 80.5c^{-0.55} (D_{bh} > 15 \text{ cm}) \quad (7)$$

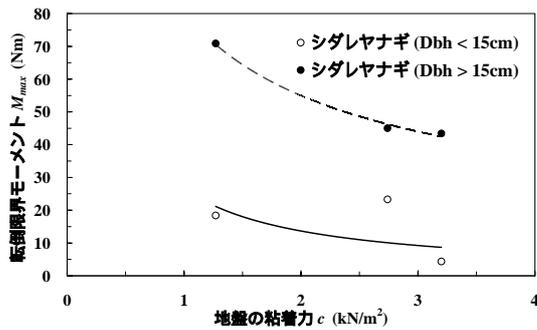


図7 地盤の粘着力による転倒限界モーメントの変化

表5 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 <sup>2</sup>	1.3	3.2	2.7
内部摩擦角	-	φ	°	60.9	35.0	39.6
平均転倒限界モーメント	シダレヤナギ	M <sub>max</sub>	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 <sub>d</sub>	m	99.4	71.7	74.0
	オニグルミ	-	-	68.0	-	63.5

図7 や式(6)-(7)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。また、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が報告されている。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、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った(表5, 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。

課題はいくつか残されているものの、法面に設置された水害防備林の設置による利点(せん断力の減少)のみならず、樹木の破壊限界を把握することで、適用限界までを含めて評価することが可能となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

1. Norio Tanaka, M.B. Samarakoon, Junji Yagisawa : Effects of roots architecture, physical tree characteristics, and soil shear strength on maximum resistive bending moment for overturning *Salix babylonica* and *Juglans ailanthifolia*, *Landscape and Ecological Engineering*(Now printing)

〔学会発表〕(計1件)

1. 田中規夫, 八木澤順治, M. Samarakoon, 佐々木寧, 利根川誠 : 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, *河川技術論文集*, Vol.16, pp.225-230, 2010.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

特に無し

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

八木澤順治(Yagisawa Junji)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 70549998

(2)研究分担者

なし ( )

研究者番号:

(3)連携研究者

なし ( )

研究者番号:

