

# 土の締固め度と草本根系の成長・伸長および 根系による土の補強効果

池谷 真希<sup>\*1</sup> 杉山 太宏<sup>\*2</sup>

## Degree of Compaction of Soil and Growth and Elongation of Herbaceous Root Systems, and the Soil-Reinforcing Effect of Root Systems

by

Maki IKEYA and Motohiro SUGIYAMA

(Received on Apr. 8, 2019 and accepted on May 9, 2019)

### Abstract

In civil engineering banking work, it is necessary to construct a stable and stiff embankment by compacting it sufficiently. It is also important to investigate the relationship between ground hardness and strength and root system elongation, because the roots of plants used to green the slope face cannot extend into soil exceeding a particular hardness. In this study, first, the relationship between the degree of compaction used for embankment management and the soil hardness, which can be used to easily measure the hardness and softness of the ground, is examined by laboratory tests. Next, herbaceous seeds are sown on black soil with different degrees of compaction, and the relationship between compaction and root system elongation and growth is examined. Furthermore, the soil-reinforcing effect of the elongated root system is examined by a box shear device with a single shear surface.

**Keywords:** Degree of compaction, Soil hardness tester, Root system elongation, Shear strength

## 1. 緒 言

年々激しさを増す豪雨によって、自然斜面や人工法面の崩壊、増水に伴う河川堤防の決壊が繰り返され、国内における斜面災害については枚挙に暇がない。このような現状にあって、斜面と法面の崩壊予知、抑止工の普及に加え、斜面表層の木本や草本の根系による防災・減災効果を評価することの重要性が高まっている。

緑化を施す法面の母体となる地盤は、自然地盤（切土）と人工地盤（盛土）に大別される。このうち盛土地盤ではその上に築造される構造物ならびに斜面の安全性・安定性を確保するために、十分な締固めを行って堅固な地盤とする必要がある。このために、室内で行う締固め試験から最適含水比  $w_{opt}$  とそれに対応する最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  を求め、現場の密度  $\rho_d$  を  $\rho_{dmax}$  の 87% から 95% とする締固め度  $D_c$  ( $=\rho_d/\rho_{dmax}$ ) による管理基準が、道路・鉄道・空港あるいは宅地造成など各分野で定められている<sup>1-3)</sup>。

一方、法面緑化用の植物の根は、地中に伸長できる限界の硬さがあると言われており、古くは山中式土壌硬度計で、近年では長谷川式土壌貫入計や SH 型簡易土壌貫入試験機で硬度の調査が行われる<sup>4-6)</sup>。硬さを表すひとつの指標として、山中式土壌硬度計による硬度 (mm) の

値が“24”を越えると「根系発達に阻害あり」あるいは「侵入困難」と評価されている<sup>7)</sup>。しかしながら、建設工事に先立ち行われる地盤の強度試験結果と土壌硬度の関係、ならびに根系の伸長との関係が調べられた事例は数少ない<sup>8)</sup>。

植物を利用した法面緑化の目的について道路土工一切土工・斜面安定工指針では<sup>9)</sup>、降雨による浸食防止、景観への配慮に加え、根系の伸長・成長による地盤の補強効果の3つが挙げられている。しかし、地盤の補強効果を定量的に評価して設計に反映する方法も、現時点では明示されていない状況にある。

以上のような背景のもと本研究では、はじめに、土の締固め管理基準値となる土の締固め度  $D_c$  と土壌硬度の関係を実験により調べている。次に、土壌硬度と土の材料特性の関係を各種力学試験によって調査した。さらに、法面緑化に利用される外来・在来植物根系の伸長・成長を、締固め度の異なる土に播種して観察し、その違いを確認するとともに、根系を含む土の簡易一面せん断試験を行い根系による地盤の補強効果について検討している。

## 2. 試料および試験について

### 2.1 試料と生育容器

\*1 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

\*2 工学部土木工学科教授

Table 1 Physical property of Kuroboku soil.

$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	$\omega_L$ (%)	$\omega_p$ (%)	Grading (%)		
			sand	silt	clay
2.35	139.0	96.4	89.9	5.5	4.6

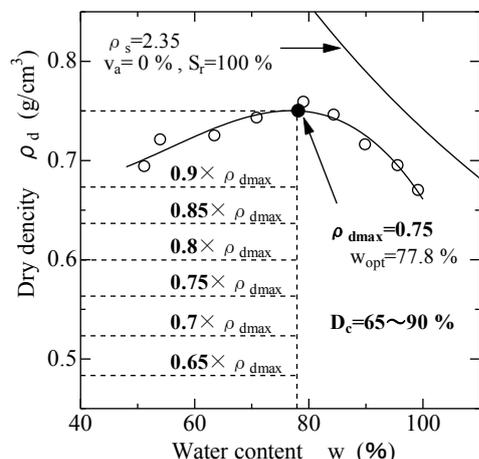


Fig. 1 Result of compaction test for Kuroboku soil.

土試料は市販されている黒土（クロボク，茨城県産）を使用し，物理的性質は Table 1 にまとめて示した．植物試料（種）は，外来草本植物イネ科のトールフェスク（*Festuca arundinacea* Schreb.; Samp.T と表記する）と在来草本植物イネ科のメヒシバ（*Digitaria ciliaris*.; Samp.M と表記する）である．

播種して生育させるための容器として，根の伸長・成長観察用と，簡易定圧一面せん断試験用に 2 種類を用意した．観察用には，内径 150 mm，高さ 150 mm の塩化ビニル管を縦割りに 2 分割したもの，簡易定圧一面せん断試験用には，内径 154 mm，高さ 85 mm の塩化ビニル管を 2 段に重ねたものを用意し，いずれも分割面は養生テープで固定した．両者の底部は，土流出防止のために 1 mm メッシュの園芸用ネットで覆っている．

## 2.2 土質試験

締固めた土の力学的性質を知るために，初めに突き固めによる締固め試験（JIS A 1210）を行った．次に，各種締固め度  $D_c$  で作成した試料に対して，土壤硬度（山中式土壤硬度計）を測定し，締固め度と硬度の関係を調べた．この関係をもとに，根の成長観察と簡易一面せん断用の締固め度を設定した．締固めた土に対して，一軸圧縮試験（JIS A 1216），透水試験（JIS A 1218）ならびに定圧一面せん断試験（JGS 0561）を行った．

### 2.2.1 突き固めによる締固め試験とその結果

購入した黒土の平均含水比は 102 % と最適含水比を大きく超えていたため，全試料を日当たりが良い場所で天日干しし含水比を約 55 % まで下げてから加水して試験に供した．試験条件は，2.5 kg ランマーで 3 層 25 回締固め，土試料は非繰り返し法を採用した（A-c 法）．

Table 2 Relationship between root elongation and soil hardness<sup>7)</sup>.

Soil hardness (mm)	27 or more	24~27	20~24	11~20	11 or less
Whether root invasion is possible	Many roots are impossible to growth	Growth inhibition of root system	A few kind of growth inhibition	No kind of growth inhibition	No kind of growth inhibition (Insufficient strength of soil)
Expression of hardness	Solidification	Hard	Compact	Soft	Loose
evaluation	××	×	△	○	△



Fig. 2 Yamanaka type soil hardness meter.



Fig. 3 Germination test.

Fig. 1 の白丸印が黒土の締固め曲線である．これから最大乾燥密度  $\rho_{dmax} = 0.75 \text{ g/cm}^3$ ， $w_{opt} = 78 \%$  を得た．この結果に基づき， $w_{opt}$  に調整した土を締固め度  $D_c = 65, 70, 75, 80, 85, 90 \%$  となるように CBR 試験用の載荷装置を利用して静的に締固め密度を管理した．

### 2.2.2 土壤硬度の測定

土の硬さと根の伸長・侵入については，Fig. 2 に示した山中式土壤硬度計から求める硬度値が指標とされており，その硬度（mm）との関係は Table 2 のようにまとめられている．

山中式土壤硬度計は，高さ 40 mm，底径 18 mm，頂角  $12^\circ 40'$  の円錐部と，遊動指標と硬度目盛りのついた円筒形の胴体の中に縮み量 40 mm に対して 8 kg の圧力を示すバネがセットされている．直径 10 cm の締固め試験用モールドに，前述した  $D_c = 65 \sim 90 \%$  の 6 通りの締固め度で静的に締固めた試料に対して，一試料平面当たり 3 カ所に硬度計を差し込んで，その平均値を土壤硬度（mm）とした．

### 2.2.3 締固め度の異なる土の力学試験

試料は， $w_{opt}$  で静的に締固めたものを使用した．一軸圧縮試験と山中式土壤硬度測定用には締固め度  $D_c = 65, 70, 75, 80, 85, 90 \%$  として，定圧一面せん断試験と透水試験では， $D_c = 65, 75, 90 \%$  とした．定圧一面せん断試験のせん断速度は 0.2 mm/min で，垂直荷重は播種した土試料の簡易一面せん断試験に近づけるため，通常よりもかなり小さな  $3.8 \sim 7.7 \text{ kN/m}^2$  とした．透水試験は変水位条件で行った．

## 2.3 植物試料と試験方法

### 2.3.1 発芽率の測定

3 つのシャーレの中に濡らしたティッシュを敷き，その上に種を各 20 粒置いて（Fig. 3），室温を 26 °C に保った状態で経過日数と発芽数を記録した．

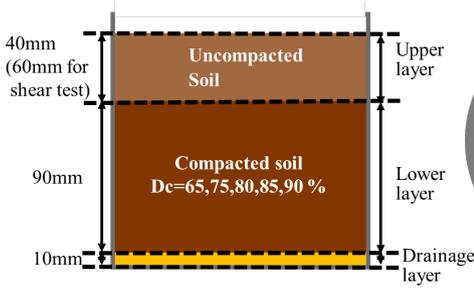


Fig. 4 Condition of the soil in the test container.

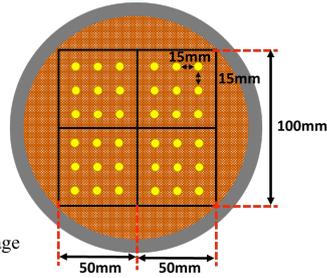


Fig. 5 Seeding position viewed from the top.

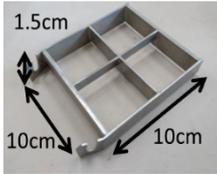


Fig. 6 Shear frame<sup>10)</sup>.

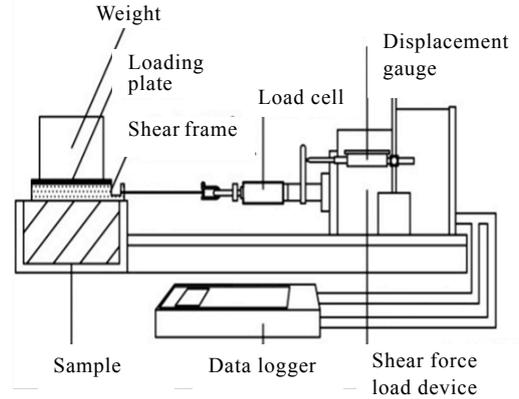


Fig. 7 Schematic diagram of the simple direct shear test apparatus.

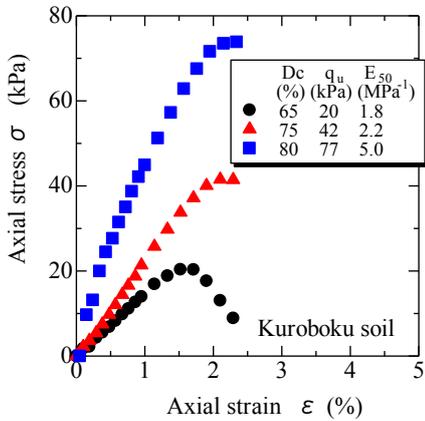


Fig. 8 Stress strain relationship in unconfined compression test.

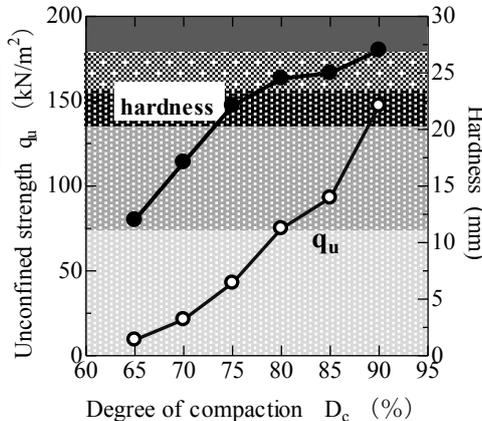


Fig. 9 Hardness, unconfined strength and D<sub>c</sub> relations.

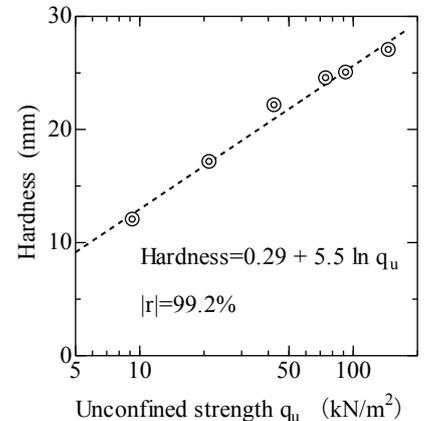


Fig. 10 Formulation of hardness by unconfined strength.

### 2.3.2 試料作成

生育容器（塩化ビニル管）の底部に、排水層として鹿沼土を 10 mm 敷き詰め、その上に層厚が 90 mm で所定の締固め度  $D_c$  となるように黒土を静的に締固めた（下部層と呼ぶ）。その上部には、根の生育が容易となるように黒土を締固めることなくふんわりと試料箱上部から 10 mm まで投入した（上部層と呼ぶ）。

播種は、100 mm 四方の範囲に一粒ずつ 15 mm の間隔を開けた。Fig. 4 と Fig. 5 は、土試料の断面図と種の配置図で、播種は 2018 年 6 月下旬に実施した。

### 2.3.3 植物の成長と根の伸長観察

生育容器を学内で日当たりの良い屋外に置き、3 ヶ月間育成した後、植物の様子を観察した。観察項目は、成長率（＝成長数/播種量）、地上部高さ、根系重量、根系長、ならびに締固めた下部層への侵入本数である。

### 2.3.4 簡易定圧一面せん断試験

育成した試料の葉（地上部）をカットし、Fig. 6 のせん断枠<sup>10)</sup>を根系を含む下部層にはめ込んだ試料箱（生育容器）に 10 cm 四方で厚さ 1 mm の載荷板を介して 4 種類のおもり（荷重 3.8, 6.1, 7.7, 10.0 kN/m<sup>2</sup>）を載荷した。その後、直ちに 1 mm/min で最大 15mm までせん断

せん断終了後、含水比と土試料中に含まれる根の量ならびにせん断面の根の本数を測定した。簡易定圧一面せん断試験機の概略図を Fig. 7 に示した。

## 3. 試験結果と考察

### 3.1 締固め土の力学試験結果

#### 3.1.1 一軸圧縮試験と地盤硬度

Fig. 8 は、一軸圧縮試験の応力ひずみ関係の一例を示したものである。締固め度  $D_c$  の増加に伴い、当然ではあるが一軸圧縮強度  $q_u$  ならびに変形係数  $E_{50}$  は増加する。 $q_u$  と山中式土壤硬度計の貫入試験から求めた土壤硬度を、締固め度  $D_c$  に対してプロットしたのが Fig. 9 である。図には、硬度に対して Table 2 内に表示した硬度区分（11 以下～27 以上）と同じ色分けを付加した。これに依れば、設定した締固め度の範囲  $D_c=65\sim90\%$  は、「根系の発達に障害なし(65, 70%)」から「多くの根が侵入困難(90%)」に分布し、 $D_c=80\%$  以上で締固めた場合、根には悪条件となる可能性が示唆される。

Fig. 9 に示した同じ締固め度に対する一軸圧縮強さと硬度の関係性を調べたのが Fig. 10 である。両者には、片対

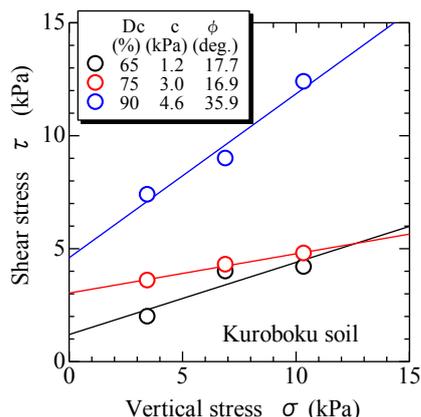


Fig. 11 Result of direct box shear test for compacted Kuroboku soil.

Table 3 Mechanical property of Kuroboku soil.

Compaction test	$\rho_{dmax}$	$g/cm^3$	0.75		
	$w_{opt}$	%	77.8		
	Dc	%	65	75	90
Unconfined comp. test	$q_u$	$kN/m^2$	20.4	41.5	65.9
Direct box shear test	c	$kN/m^2$	1.2	3	4.6
	$\phi$	°	17.7	16.9	35.9
Permiability test	$k_{15}$	$cm/s$	$9.63 \times 10^{-5}$	$1.19 \times 10^{-5}$	$3.59 \times 10^{-8}$

数紙上で高い相関性が確認され、図中に示した回帰直線で表される。地盤の硬度と一軸圧縮強さについては、改良土に対して行われた両者の比較結果でも高い相関性が見出されているが<sup>7)</sup>、締固め度、硬度ならびに一軸圧縮強さは、極めて高い関係性があることを表している。

### 3.1.2 せん断強さと透水性

定圧一面せん断試験から得られたクーロンの破壊基準線を、締固め度で比較して示したのが Fig. 11 である。土圧の小さな法面の表層を想定して、かなり小さな垂直応力を与えたが、破壊時のせん断応力は締固め度の増加により増加して、図の上方にプロットされる。締固め度  $D=90$  %では、見かけの粘着力  $c$  とせん断抵抗角  $\phi$  が、他の2条件の2倍程度まで増加して、締固めの効果が確認できる。

Table 3 には、締固めた黒土の力学試験の結果をまとめて示した。変水位による透水試験で求めた透水係数は、 $D=90$  %の値が他よりも3オーダー小さくなっており、強度定数と同様、締固めの効果が明らかである。

## 3.2 植物試料の成長観察結果

### 3.2.1 発芽率

シャーレで観察したメヒシバとトールフェスクは、いずれも播種してから3日後に発芽が確認された。その後、2週間までの発芽率は70%であった。トールフェスクの公称の発芽率は80%であることから、それよりは低い結果であった。

### 3.2.2 成長観察

成長観察用の高さ150 mm、2つ割塩ビ管で育成した2

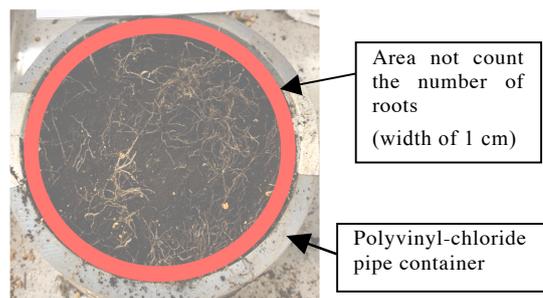


Fig. 12 Distribution of root system at 10 mm from bottom of container (Sample T, Dc=65 %).



Fig. 13 A state of growing plants.

Table 4 Measurement results of plants.

Dc		65%	75%	80%	85%	90%	
Growth rate (%)	Samp. M	19.5	15.3	22.2	41.1	43.1	
	Samp. T	63.9	62.5	66.7	44.4	59.7	
Leaf height (cm)	M	15.6	17.8	28.3	17.2	15.8	
	T	39.0	34.0	40.0	43.0	33.5	
Root weight (g)	M	10.8	7.8	12.5	10.2	5.6	
	T	78.7	58.9	83.7	44.0	47.0	
Root length (cm)	M	22.5	25.0	/	/	13.0	
	T	21.0	22.0	/	/	15.0	
Number of roots (Distance from bottom)	100 mm	M	30.0	15.0	28.0	22.0	13.0
		T	80.0	80.0	45.0	45.0	43.0
	55 mm	M	14.0	15.0	21.0	22.0	7.0
		T	75.0	80.0	50.0	45.0	36.0
	10 mm	M	18.0	20.0	26.0	30.0	10.0
		T	96.0	90.0	40.0	36.0	54.0

試料、メヒシバとトールフェスクの成長率 (=成長数/播種量) と地上部高さを測定後、根系重量、根系長、ならびに締固めた下部層への侵入本数をそれぞれ測定した。

根の侵入本数は、塩ビ管の底部から土をかき出して、塩ビ管底部から10 mm、55 mm、100 mmの位置に侵入した根の本数を数えた。底部から100 mmは未締固め土との境界、55 mmは締固めた土の中心部、10 mmは鹿沼土を取除いた下端である (Fig. 4 参照)。測定した根系の太さは約0.15 mm以上とした。なお、Fig. 12に示した塩ビ管から1 cmの幅にある根は、水みちに沿って伸長したもものとして測定本数から除外した。

Fig. 13は、播種後の屋外で生育途中の様子で、3ヶ月経過後の各種計測結果をTable 4にまとめて、そのうち締

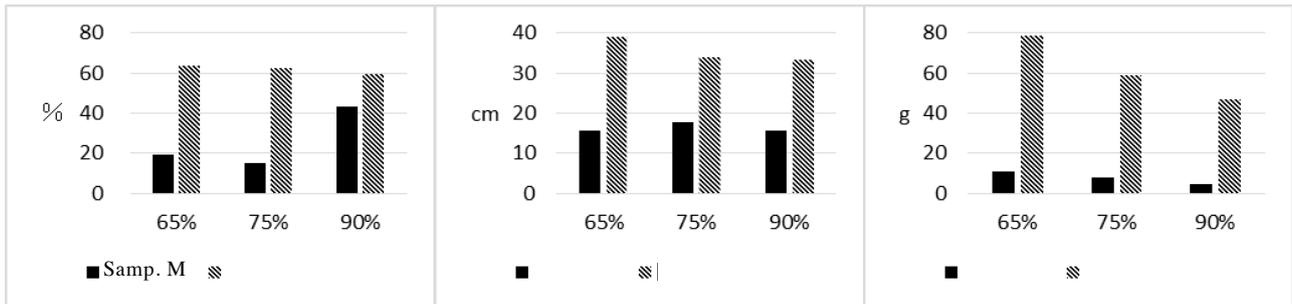


Fig. 14 Growth rate.

Fig. 15 Leaf height.

Fig. 16 Root weight.

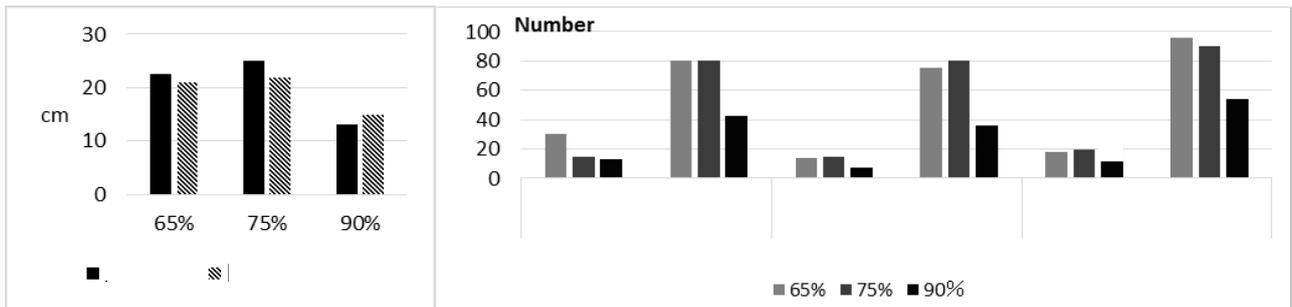


Fig. 17 Root length.

Fig. 18 Number of roots.

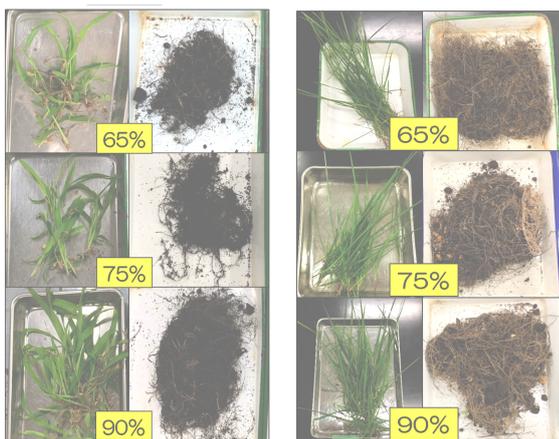
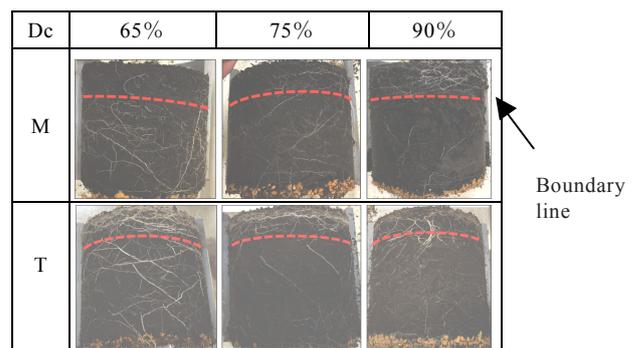


Fig. 19 Leaves and roots ( $D_c=65\sim 90\%$ ).

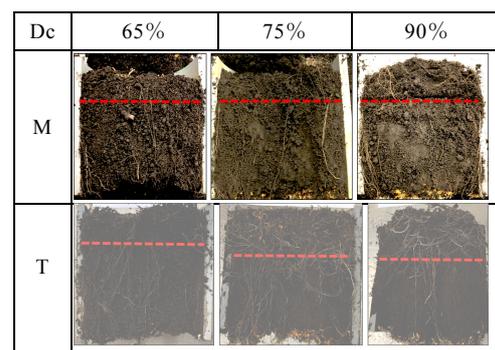
固め度  $D_c=65, 75, 90\%$ の結果を棒グラフにして Fig. 14 から Fig. 18 にそれぞれ示した。

まず、成長率、地上部高さ（葉部）ならびに根系の重量と長さ（Table 4 の上部 4 行, Fig. 14~Fig. 17）から、成長率と地上部高さについては、両試料とも締固め度によらずほぼ同程度の値を示し、その影響は少ない結果となった。これに対して根系の重量と長さは、緩い状態に分類される  $D_c=75\%$ 以下と比べて  $D_c=90\%$ では 6 割程度に減少し締固め度の影響を受けることがわかる。Fig. 19 は、 $D_c=65, 75, 90\%$ で測定した葉と根である。

次に、Table 4 の下部 3 行と Fig. 18 から、3 つの深さで根の侵入本数を比較した結果については、植物によって根の侵入傾向に違いが観察された。すなわち、メヒシバでは各深さにおいて  $D_c=85\%$ を境に侵入本数の違いが現れたのに対して、トルフェスクでは  $D_c=75\%$ がその境界となった。65%と 90%の各深度における根の本数を比較すると、両植物ともほぼ 90%では半減しており、従前から指摘されているとおり締固め度の増加、土壌硬度の



(a) Around the sample

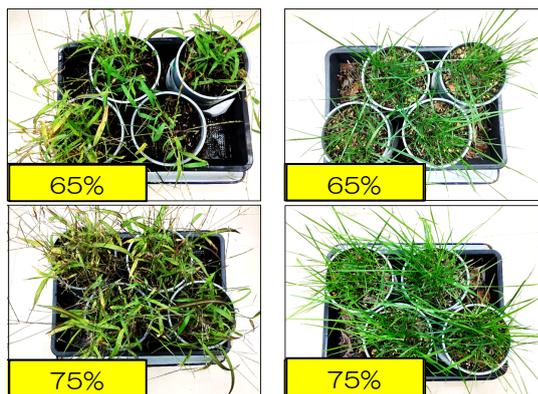


(b) Mid-section of the sample

Fig. 20 Distribution of roots depending on degree of compaction.

増加により根の侵入が困難となることが確認された。しかし、Table 2 に示した既往の研究で硬度 27 mm に相当する  $D_c=90\%$ は、「ほとんど根の侵入が困難」と評価されているにも拘らず根は侵入しており、少ないとは言えない量であることが確認された。

Fig. 20 は、根の分布を試料ならびに締固め度毎で比較



(a) Sample M (b) Sample T  
Fig. 21 Plants for shear test after 3 months.

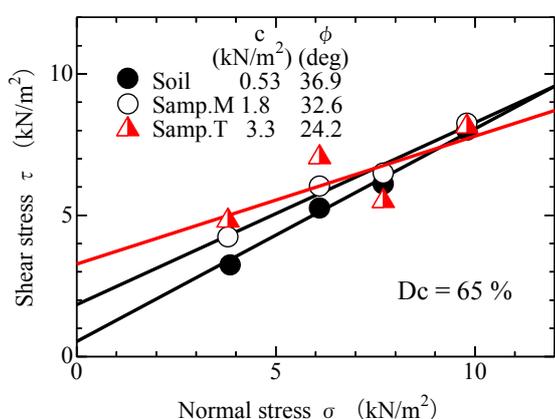


Fig. 22 Results of simple direct shear box tests ( $D_c=65\%$ ).

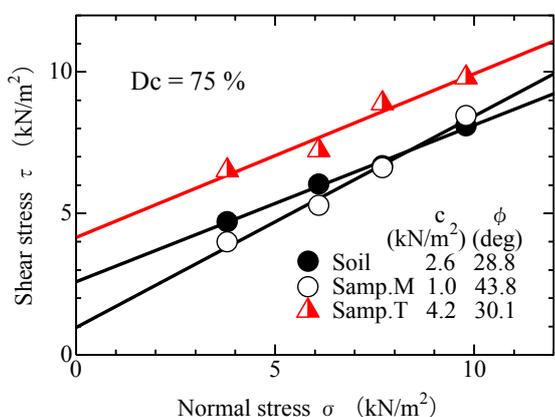


Fig. 23 Results of simple direct shear box tests ( $D_c=75\%$ ).

したもので、Fig. 20(a)は縦半割の塩ビ管を外した試料周囲の様子を、Fig. 20(b)は中央部断面の様子をそれぞれ示している。メヒシバでは判り辛いですが、 $D_c=65\%$ では下部の締固め層を含む全般に根の伸長が観察されるのに対し、 $D_c=90\%$ では未締固め上層4cmに密集して、破線より下の締固め層への根の侵入が少ないことがよくわかる。

### 3.3 簡易定圧一面せん断試験

Fig. 21は、一面せん断試験を行った播種後3カ月の成長した各植物の様子である。これら各4試料を1セットとして試験に供した。



Fig. 24 Roots of cross section in shear frame after shearing.

Fig. 22は、 $D_c=65\%$ の試料から得られた垂直応力と最大せん断応力の関係で、黒土のみを黒丸、メヒシバを白丸、トルフェスクを三角の記号でそれぞれ示している。図中には最小二乗法で計算した粘着力 $c$ とせん断抵抗角 $\phi$ を記しており、その値の比較から、根系の混入によって粘着力は3~6倍に増加、せん断抵抗角は1割から3割減少している。緑化が施されるのは斜面の表層であるため、粘着力の増加は安定に対して非常に効果的であるが、せん断抵抗角の低下は上載荷重の小さな表層部のせん断強度にほとんど影響はない。

Fig. 23は $D_c=75\%$ の結果で、締固め度の増加により黒土のみの粘着力が $D_c=65\%$ よりも5倍程度増加している。トルフェスクでは、黒土単体と較べて粘着力が1.6倍に増加した。しかし、メヒシバでは粘着力が低下する結果となった。Fig. 24は、せん断後に、トルフェスクのせん断面の根を丁寧にカットして撮影したせん断枠内の断面の様子で、白く見えるのがせん断面の根である。

著者らは、これまでもトルフェスク他の植物を使用した同装置による簡易一面せん断試験によって根による土の補強効果を調べており<sup>10,11)</sup>、粘着力が1.5~3倍程度に増加することを報告している。締固め度を管理して実施した今回の試験においても、外来種であるトルフェスクは、特に根による地盤の補強効果が高いことが確認された。

## 4. まとめ

山中式土壌硬度試験の判定基準において、「根系の発達に障害なし」から「多くの根系が侵入困難」とされる締固め度 $D_c=65\sim 90\%$ で締固めた黒土に対し一連の土質試験を行い、土壌硬度と締固め度ならびに力学試験の相関性が高いことを確認した。また、締固め度と根の侵入を調べた結果、 $D_c=65, 75\%$ の試料は判定基準で「根系の発達に障害なし」という結果の通りメヒシバもトルフェスクも根が容易に侵入すること、さらに「根系発達に障害あり」または「多くの根系が進入困難」であるはずの $D_c=80\%$ 以上でも根系は一定量の侵入できることが確認された。また、根系による地盤の補強効果は、主として粘着力の増加として現れ、今回の結果では、トルフェスクの補強効果がより顕著であった。

盛土斜面の安定性評価にあたり、締固め度と地盤強度の関係の把握が重要視されているが、緑化されたのり面表層部の地盤と根の伸長ならびに補強効果の発生メカニズムについてもさらに調べる必要がある。

**謝辞：**本研究の実施にあたり 2018 年度卒の新津清弥君、山口友輔君、和田一希君には、試料作成や試験実施などにおいて多大な協力を得た。記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 地盤工学会編，土の締固め，地盤工学・実務シリーズ p.30 (2012).
- 2) 港湾空港建設技術センター，空港土木工事共通仕様書, pp.1-7 (2007).
- 3) 日本道路公団，設計要領第一集土工編 (1998)
- 4) 長谷川秀三，川九邦雄，今川映二郎，長谷川式土壤貫入計による緑化地の土壌調査, 昭和 56 年日本造園学会春季大会研究発表要旨, pp.43-44 (1981).
- 5) 飯嶋盛雄，根の成長と土壌の機械的抵抗(1)，農業および園芸 Vol.67, pp.1151-1156 (1992).
- 6) 長谷川秀三，根系深さの推定方法，特集「斜面の安定と根系を巡る諸問題」，日本緑化工学会誌，Vol.31, No.3, pp.346-351 (2006).
- 7) 社団法人日本造園学会緑化工学研究委員会：緑化事業における植栽基盤整備マニュアル，ランドスケープ研究 Vol.63, pp.224-241 (2000).
- 8) 宗岡寿美，菅原大貴，山崎由理，木村賢人，辻 修，法面方位の違いを考慮した 2 種類の外来草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性，日本緑化工学会誌，Vol.43, No.1, pp.15-20 (2017).
- 9) 社団法人日本道路協会編，道路土工一切土工・斜面安定工指針（平成 21 年度版）(2009).
- 10) 池谷真希，西野文貴，杉山太宏：草本根系の地盤補強効果に関する基礎実験，第 14 回地盤工学会関東支部発表会 Geokanto2017, CD-ROM (2017).
- 11) 池谷真希，杉山太宏：土の締固め度と草本根系の成長・伸長および根系による土の補強効果，第 15 回地盤工学会関東支部発表会 Geokanto2018, CD-ROM (2018).