

植生の根茎が河川堤防法面の 浸透・強度特性に与える影響

SEEPAGE AND STRENGTH CHARACTERISTIC BY THE RHIZOME OF PLANTS ON RIVER LEVEES

福原直樹¹・森 啓年²・服部 敦²

Naoki FUKUHARA, Hirotooshi MORI and Atsushi HATTORI

¹正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
(茨城大学大学院 環境機能科学専攻) (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室(同上)

A seepage and strength characteristic by the rhizome of plants were examined with specimen from actual river levees. The weight measurement of rhizome was conducted as laboratory measurement, and the permeability test and box shear test were carried out as soil tests in this study.

As the results of laboratory measurement, the negative correlation of the degree of compaction and the weight of rhizome was observed. By contrast, the series of soil tests showed that permeability and shear strength was increased with the existence of rhizome. The safety factor of slope with rhizome was calculated by slope stability calculation to show that the rhizome is effective to prevent the surface sliding failure of river levee.

Key Words : river levee, plants, rhizome, permeability, shear strength

1. はじめに

堤防の法面等に草丈が高く根が深い雑草が繁茂すると、土壌の緊張力が低下し、あるいは土壌が腐植土化することにより、堤防の表層が弱体化して、法崩れ、ひびわれ、陥没等の誘引となる場合がある¹⁾。そのため、国管理の河川堤防においては年2回の除草頻度を基本として植生管理を実施し、根が深い雑草の繁茂を抑制するなどの堤防表層の保全を行ってきた。しかし根の侵入による堤防の表層の弱体化とそれに伴う安全性の低下についての定量的な評価は行われておらず、定性的な知見に留まっているため、根が堤防の安全性へ及ぼす影響や管理上問題となる根の侵入深度等を把握するには至っていない。堤防の安全性の向上を念頭に置いて、根を深く張る植生の繁茂を抑制する、それでも経年的に深く根が侵入していく場合には定期的に堤防の表土の打ち替えを実施する等の維持管理施策への反映を図っていくことが求められる。

根茎が透水特性に与える影響は、限られた植生を対象としているものの、根茎の混入率の増加にともなって飽和透水係数も増加するとの知見が得られている²⁾。一方、

根茎がせん断強度に及ぼす影響については、その多くは樹木の根茎を対象とした研究であり、草本植物の根茎を対象とした研究は一部でしか行われていない。草本植物の根茎を対象とした研究によると、土に根茎が混入した場合は根の摩擦抵抗や引抜き抵抗力等によってみかけの粘着力が増加する一方で、内部摩擦角が若干減少すること、低拘束圧下のほうが根茎の影響が顕著に現れることが報告されている³⁾⁴⁾。みかけの粘着力の増加の効果については、樹木の根茎を対象とした研究においても同様の結果が示されている⁵⁾。また、樹木の根茎を対象とした試験において、せん断抵抗力に大きく作用するのは根毛(直径約3mm未満)であるとの知見が示されており⁶⁾、草本植物の根茎の径を考慮すると、樹木の根茎における知見も草本植物に活用可能であると考えられる。そこで、これら既往研究の知見を踏まえ、河川堤防法面に繁茂する植生への適用性を検証し、知見を蓄積していくことが必要である。

本研究は、河川堤防に繁茂する草本植物の根茎が河川堤防法面の浸透・強度特性に与える影響についての知見を得ることを目的としている。そのため、実際の河川堤防から不撓乱で採取した植生の根茎を含んだ供試体及び

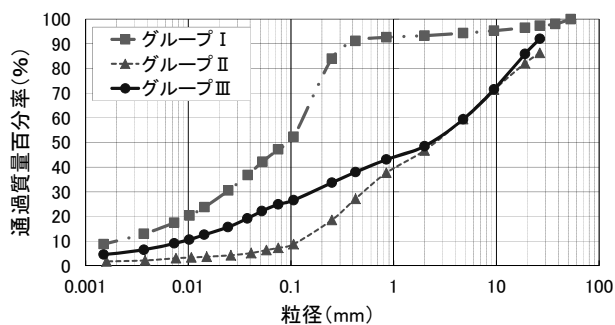


図-1 粒度分布



写真-1 一面せん断試験機

表-1 各供試体の土質条件、根茎条件、試験条件及び実施試験

グループ	ケース	堤体土質条件				根茎条件			試験条件及び実施試験							
		土質の工学的分類	D ₅₀ (mm)	最大粒径 (mm)	細粒分含有率 (%)	優占植種	主根の平均径 (mm)	根毛の平均径 (mm)	試験時の根茎の有無	一面せん断試験実施時の土質状態	根茎量調査	締固め度調査	透水試験		一面せん断試験	
													現地の状態	締固め度 80, 85, 90%	現地の状態	締固め度 80, 85, 90%
Ⅰ-①	Ⅰ-1	礫まじり粘性土質砂	0.14	53.0	47.2	オギ	7.20	0.43	根茎あり	湿潤	○	○	○	---	○	---
	Ⅰ-2								根茎なし	湿潤			○	---	○	---
Ⅰ-②	Ⅰ-3								根茎あり	飽和			○	---	○	---
	Ⅰ-4								根茎なし	飽和			○	○	○	○
Ⅱ	Ⅱ-1	粘性土まじり砂質礫	4.8977	75	7.3	ヨシ	11.20	0.50	根茎あり	湿潤	○	○	---	---	○	---
	Ⅱ-2								根茎なし	湿潤			---	---	○	---
Ⅲ	Ⅲ-1	粘性土質砂質礫	4.9437	75	24.9	セイタカアワダチソウ	9.90	0.33	根茎あり	湿潤	○	○	---	---	○	---
	Ⅲ-2								根茎なし	湿潤			---	---	○	---

根茎を除去した状態を再現した供試体を用いて透水試験及び中型一面せん断試験を実施した。あわせて、供試体採取した周囲において締固め度及び根茎量の調査を行った。ここで、根茎量は堤体土の単位体積あたりに含まれる根茎の湿潤重量である。それらの結果を用いて根茎の影響を透水係数、せん断強度の観点から検討した。また、斜面安定計算を行い、根茎が及ぼす堤防の表層すべりへの影響について主にせん断強度の観点から検討した。

2. 調査・試験方法と条件

(1) 供試体採取

主に都道府県管理堤防から高茎草本植物が繁茂している区間を選定し、堤防の法面から植物とその繁茂基盤である土砂を一体として不攪乱で採取した。土塊の採取は、鋼製型枠（B=0.96m, L=1.46m, H=0.508m）を堤防法面に垂直に設置し、土塊が攪乱されないよう、その周囲を徐々に掘り下げながら、鋼製型枠を挿入することで行った。また、枠の挿入時に切断されないような太い根茎については挿入する前に切断するなど、土塊が可能な限り攪乱されないように配慮した。その後、採取した土塊から各土質試験用の根茎を含む不攪乱供試体の採取を行い、試験を実施した。また、上記試験実施後には、土のみの

影響を把握するために、測定した締固め度をもとに鋼製型枠内に根茎を除いた土の状態を再現し、根茎を含まない供試体の採取を行い、試験を実施した。

各土質試験の供試体について、対象とした箇所の土質、優占植種、根茎の平均径及び実施した試験を表-1に、各グループの粒度分布を図-1に示す。なお、グループIについては、隣接した2箇所から土塊を採取した。後述する(3)、(4)の試験については土塊毎に実施しているため、それらを区別し、グループ名の末尾に①、②を付与して表記する。

(2) 締固め度及び根茎量調査

後述する(3)、(4)の供試体を採取した周囲において、締固め度及び根茎量調査を深度別に行なった。具体的には、締固め度は表層から深度30cmの範囲において5cm毎に計測した乾燥密度と、同様の土を用いた土の締固め試験から得られた最大乾燥密度から算出した。また、根茎量については、堤防の表層から塩化ビニル管（φ10cm）を深度25cmまで打ち込んだ後、塩化ビニル管周囲を掘削し不攪乱の状態にて採取した供試体を用いて実施した。採取した延長25cmの塩化ビニル管を1cm毎（根茎量が著しく減少している深度からは5cm毎）に切断した後、土と根茎をふるい、水洗いにて分離した後、20℃の室内で60分間自然乾燥させた後、湿潤状態である根茎の重量を主根と根毛に分けて測定した。

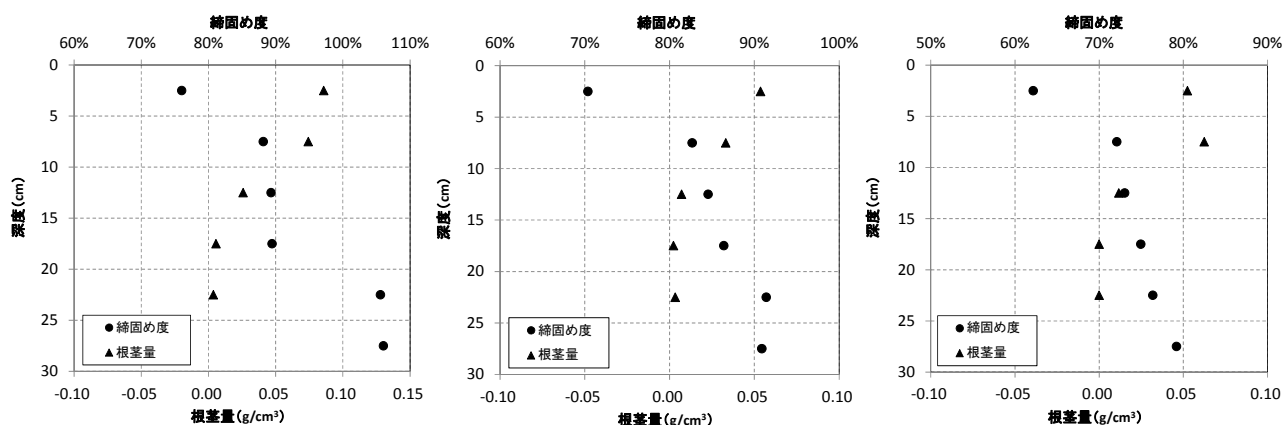


図-2 根茎と土の締固め度の深度分布 (左から、グループ I-①, グループ II, グループ III)

(3) 透水試験

a) 供試体の採取・作成方法

根茎を含む不攪乱供試体の採取は、鋼製型枠内から繁茂している高茎草本植物を刈り取った後、JISA1218で規定されているφ10cm、深さ12cmの大きさのサンプラーを用いて行った。

採取後、鋼製型枠内の土を深度5cm層ごとに採取し、ふるいを用いて土と根茎を分離した。その結果得られた根茎を除去した土を用いて、鋼製型枠内に根茎を除いた土の状態を表層から深度30cmまで再現した。その際、表層から深度5cm層ごとの締固め度が根茎を含む場合と同等の条件となるように再現した。その後、根茎を含む不攪乱供試体を採取した同一の深度にて、根茎を含まない供試体の採取を行った。また、根茎を除いた土を用いて、締固め度80%、85%、90%に設定した供試体もあわせて作成した。

b) 試験方法

採取した供試体に対して、変水位透水試験をJISA1218に準拠して実施した。また、根茎が含まれる不攪乱供試体については透水試験実施後に供試体に含まれる根茎量を(2)と同様の方法にて測定した。

(4) 中型一面せん断試験

a) 供試体の採取・作成方法

根茎を含む不攪乱供試体の採取は、繁茂している高茎草本植物を刈り取った後、幅20cm、奥行20cm、高さ30cmの一面せん断試験用の型枠を採取した土塊に垂直に打ち込み、型枠周囲を徐々に掘り下げながら挿入することで行った。供試体は、1条件につき隣接する3箇所から採取した。

根茎を含まない供試体については、(3) a) と同様の手順にて根茎を含まない土の状態を再現した後、不攪乱試料の採取と同様の手順にて採取した。また、根茎を除いた土を用いて、締固め度80%、85%、90%に設定した供試体についても作成した。

b) 試験方法

採取した供試体を中型一面せん断試験機に設置し、死荷重の条件にてせん断試験を実施した。一部の供試体においては、試験直前まで水浸し飽和状態とした上で試験を行った。飽和条件にて実施した供試体については、表-1に付記する。せん断深度は5cm、7.5cm、10cm、15cm、17.5cm、20cmの6断面を設定し、せん断速度1mm/minの条件にて、1供試体につきせん断断面が10cm離れた2つのせん断深度を設定した。一面せん断強度は、そのピークが発現した場合もしくはせん断面上部と下部のずれが供試体の径の15%に達した場合の値に対して歪みを考慮した面積で除した値とした。また、一面せん断試験実施後には、せん断面の上下5cm (計10cm) の範囲に含まれる根茎量を(2)と同様の方法にて測定した。

3. 調査・試験結果及び考察

(1) 根茎と土の締固め度

図-2に根茎量と土の締固め度の深度分布を示す。ばらつきが認められるものの、根茎量の多い表層付近にて土の締固め度が低下していることが確認できる。一方で、深度の増加に伴い根茎量は低下していくが、土の締固め度は増加した後、ほぼ一定値となる傾向にあることが確認できる。各供試体にて土質材料や施工条件、築堤後の経過年数等が異なるため、根茎量と締固め度の低下率の定量的な関係は見られないものの、全体的な傾向として、根茎量と締固め度の深度分布は負の相関があることが確認された。一般的に締固め度と透水係数やせん断強度には強い関係がある⁷⁾。このことから、土に対する根茎の影響を検討するにあたっては、根茎自体の影響と根茎の侵入による土の締固め度の低下 (ゆるみ) の影響の双方を考慮する必要があることが判断できる。

(2) 根茎と浸透特性

根茎自体が浸透特性に与える影響を把握するため、土の条件を同等に設定し、根茎の有無のみを変えた供試体

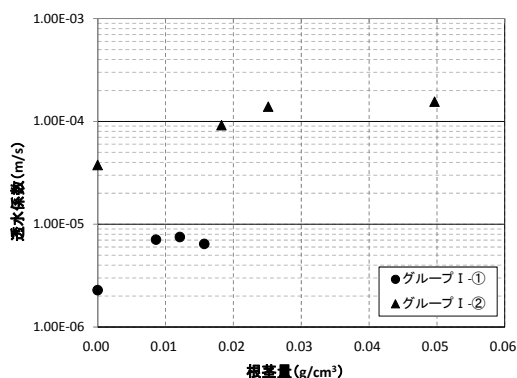


図-3 根茎量と透水係数の関係 (グループ I)

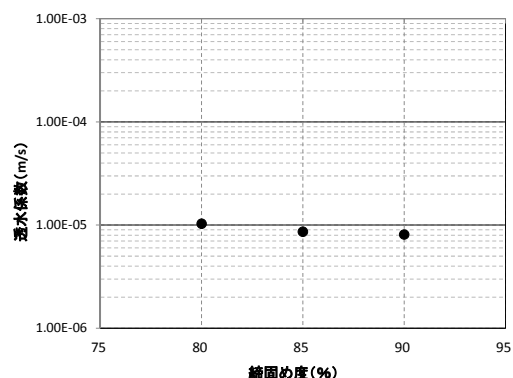


図-4 締固め度と透水係数の関係 (グループ I-②)

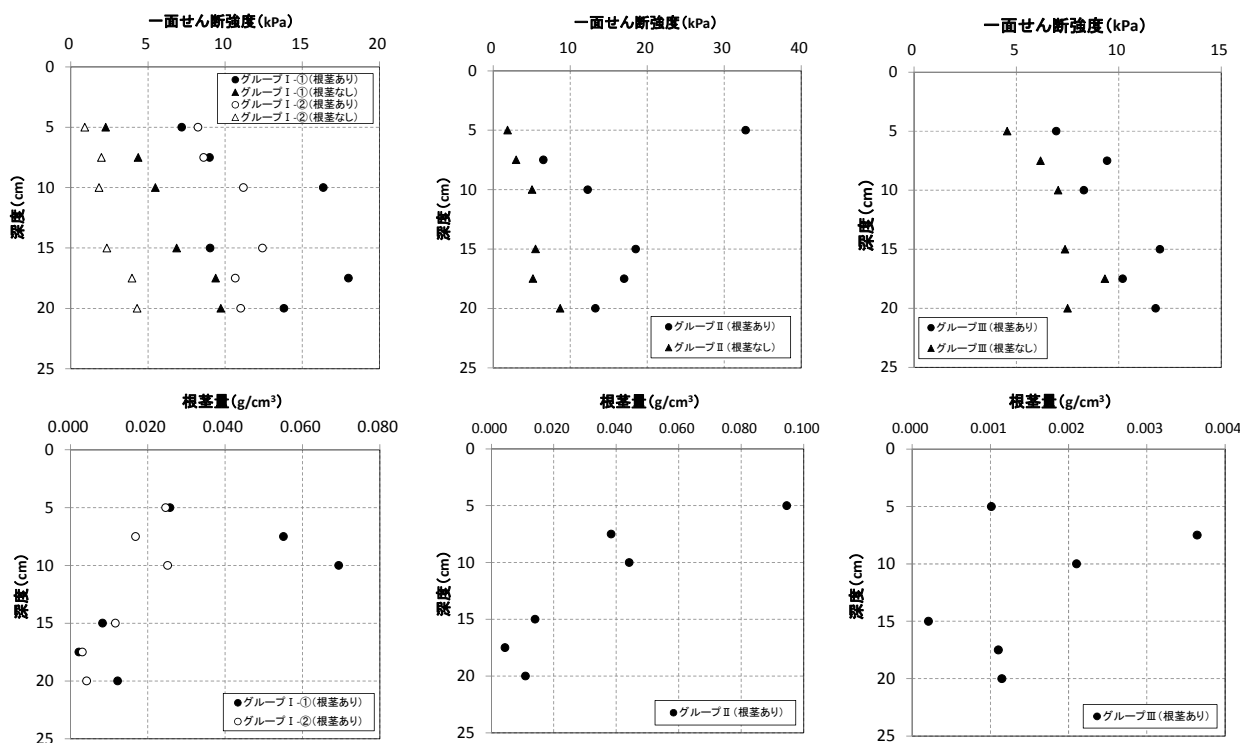


図-5 一面せん断強度と根茎量の深度分布

の透水試験結果の比較を行った。図-3に根茎量と透水係数の関係を示す。根茎ありの透水係数は根茎なしの透水係数に比べ大きく上昇していることが分かる。根茎量の増加に伴い上昇する傾向も確認できるものの、根茎が混入することによる変化幅よりも小さいものであった。なお、透水係数は最大で約4倍程度の増加が確認された。

また、土の締固め度の違いによる浸透特性を把握するため、上記と同等の土質を用いて異なる締固め度を設定した供試体の透水試験結果について図-4に示す。締固め度の低下に伴って透水係数が上昇する傾向は確認できるものの、今回試験を行った供試体においては、締固め度を90%から80%に低下した場合、透水係数は約1.2～1.3倍増加する程度となった。既往の研究⁷⁾によると締固め度の低下によって透水係数は増加することが示されており、本試験と同程度の細粒分含有率の供試体では締固め度90%から80%への低下に伴って透水係数が約10倍程度

増加することが報告されている。このような差異が生じた原因は明確でないが、本試験の場合には、根茎の混入による締固め度の低下が透水係数増加の主要因とは考えにくく、根茎自体による影響が大きいと考えられる。

根茎の生長や地上部の動揺に伴って、土壤中に小さな割目や根茎と土壌の間に間隙が生じる⁸⁾ことを考慮すると、透水係数が上昇した主要因は、上記によって生じた土の割目や間隙部を伝って浸透する影響が大きいと想定される。

(3) 根茎とせん断強度特性

根茎自体がせん断強度特性に与える影響を把握するため、土の条件を同等に設定した根茎の有無のみが異なる供試体の中型一面せん断試験結果及び根茎量の深度分布を図-5に示す。湿潤状態 (グループ I-①, II, III) では、いずれの深度においても根茎なしに比べて根茎ありの供

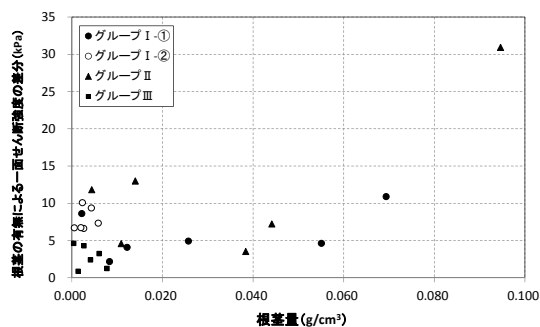


図-6 根茎量と一面せん断強度増加分の関係

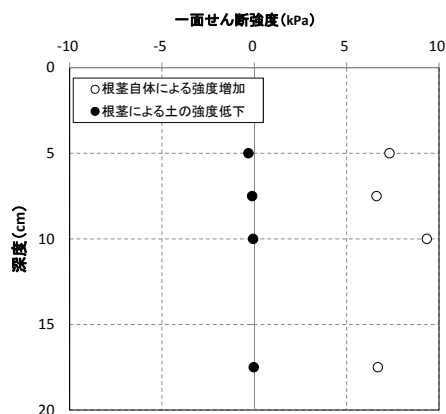


図-8 根茎の混入による強度増加と締固め度による強度低下の関係 (グループ I-②)

試体の一面せん断強度が上回る結果となった。表層部である5cmの深度に着目すると、根茎ありの供試体では、最小でも7kPa程度のせん断強度が確認できる一方で、根茎なしの再構成土の結果では2～5kPaであり、根茎によって1.5～17倍強度上昇することが確認された。これは飽和状態 (グループ I-②) でも同様の傾向が確認されており、根茎が混入することにより、せん断強度が増加することが判断できる。

ここで、根茎の有無による一面せん断強度の差分と根茎量の関係を図-6に示す。根茎の有無による一面せん断強度の差は確認できるものの、一面せん断強度の増加分と根茎量の相関は見られなかった。よって、根茎の強度には、根茎量とは異なる根茎の諸元が寄与していると考えするが、今回の検討ではその特定には至らなかった。

次に、異なる締固め度を設定した供試体の一面せん断強度結果に関する関係を図-7に示す。なお、深度15cmにおける一面せん断強度はいずれの締固め度においても著しく低下したため、以降の検討においては除外している。低い締固め度に設定した供試体ほど一面せん断強度が低いことが確認できる。

図-8に「根茎自体による強度増加」と「根茎による土の強度低下」の深度分布を示す。根茎自体による強度増加は、深度ごとの根茎ありの条件と根茎なしの条件におけるせん断強度の差分と定義し、図-5に示したせん断強度から算出した。一方、根茎による土の強度低下は、河川堤防の施工基準である90%の締固め度に対応するせん

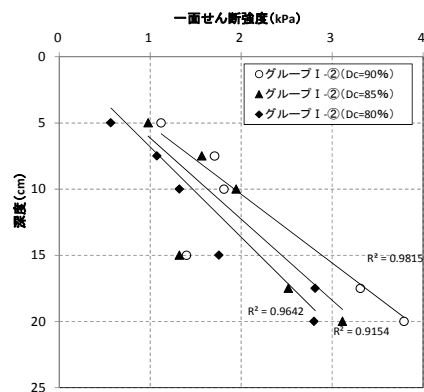


図-7 異なる締固め度における一面せん断強度の深度分布 (グループ I-②)

断強度を基準とし、図-2に示した各深度の根茎の混入により低下した締固め度に対応するせん断強度の差分と定義した。なお、各締固め度に対応するせん断強度は図-7に示した値から内挿して近似値を計算し求めた。締固め度によるせん断強度の低下は最大で0.42kPaに対して、根茎による増加は最小でも6.6kPaであり、締固め度によるせん断強度の低下よりも根茎によるせん断強度の増加が大きく上回っていることが判断できる。

4. 根茎による表面のすべり安定性に対する効果

河川堤防の法面は2割勾配を基準として設計されることが多いが、用地の制約等によって2割を下回る法面勾配で施工されることもある。上記に該当する箇所では、施工時の制限からバケット転圧等による締固めに頼らざるをえないこともあり、締固めが不十分になってしまう場合もある。そうした実情を踏まえ、内部摩擦角 ϕ が法面勾配 θ を下回る場合における、表層すべりに対する根茎の効果について検討を行った。内部摩擦角が卓越する材料の場合、すべりに対する安全性は内部摩擦角と深度に依存する。上記の概念図を図-9に示す。なお、実際には深くなるにつれ、土の自重によって締め固まり土の強度も増加するが、図-9はその効果については考慮していない。また、地表以深では飽和状態と仮定している。この場合、根茎がない条件では表層付近でせん断力がせん断抵抗力を上回るため、極浅い位置ですべり破壊が生じる。根茎はみかけの粘着力⁹⁾によって、せん断抵抗力を増加させる効果があることを考慮すると、根茎によるせん断抵抗力の補強効果によってせん断抵抗力がせん断力を上回る場合が考えられる。根茎の侵入深度付近よりも深い範囲においては、せん断力がせん断抵抗力を上回るため、いずれの深度においてもすべりが生じる可能性はある。しかし、表層すべりの外力は降雨による浸透であり、表層からの浸透によって飽和度が上昇することを考慮すると、せん断力がせん断抵抗力を最初に上回る根茎の侵入深度付近ですべりが生じる可能性が高いと想定さ

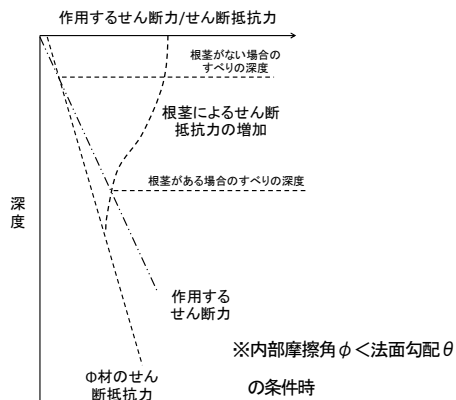


図-9 根茎によるせん断強度増加の概念図

れる。この想定は、植生が根付く前である竣工直後の堤防で表層すべりが多いことや築堤からの経過年数が長い堤防において根茎の侵入深度付近ですべりが生じた被災事例⁹⁾があることなどと矛盾しない。これらのことから、根茎は極浅い深度におけるすべり破壊の発生を抑制する効果があると考えられる。

上記を踏まえ、3. で得られたせん断強度をせん断抵抗力として入力し、直線すべりに対する斜面安定計算を実施した。なお、せん断力は土の飽和単位体積重量から計算し、法面勾配は堤防の一般的な形状である2割勾配を設定した。その結果、根茎を含む場合の直線すべりに対する安全率は根茎を含まない場合と比べ10cmの深度にて約6.5倍、20cmの深度では約2.7倍増加した。この結果は、根茎が侵入する深度に限定されるものの、根茎によって透水性の上昇により雨水が浸透しても、表層の直線すべりに対する安全性が向上することを示唆している。

5. 結論

実堤防から採取した供試体を用いた締固め度及び根茎量調査、透水試験、中型一面せん断試験を通じて、根茎が河川堤防法面の浸透・強度特性に与える影響について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 根茎量の増加に応じて土の締固め度は低下する傾向が確認された。これにより、根茎の浸透・強度特性を把握する際は、根茎の侵入による影響と土の締固め度の低下（ゆるみ）による影響の双方を検討する必要があることが示された。
- (2) 根茎の侵入に伴って透水係数は増加することが確認された。しかし、本検討で用いた試料においては、根茎量と透水係数の明確な相関は見られなかった。また、土の締固め度の低下によっても透水係数は増加したが、根茎の混入よりも影響は小さいことが確認された。
- (3) 根茎の侵入に伴ってせん断強度は増加することが確認された。しかし、本検討で用いた試料においては、根茎量との明確な相関性は見られなかった。また、

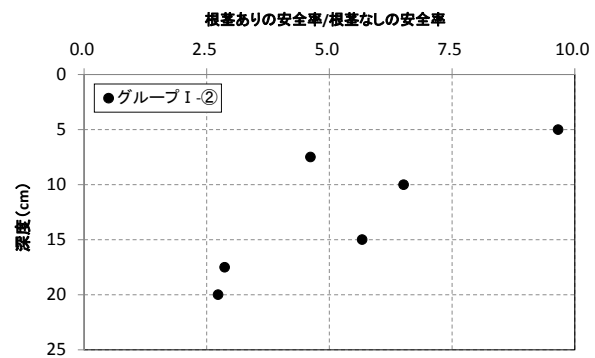


図-10 各深度における根茎あり及び根茎なしにおける安全率の比率

土の締固め度の低下に伴いせん断強度も低下するが、根茎の混入よりも影響は小さいことが示された。

- (4) 飽和条件下における斜面安定計算の結果から、根茎は表層の直線すべりに対する安全性を向上させる効果があることが示された。これは、根茎によって透水性の上昇により雨水が浸透しても、表層の直線すべりに対する安全性が向上することを示唆している。

堤防築堤時には、法面表層に張芝を行うのが一般的である。本検討では、地下茎を主体とする比較的根が深くまで張る高茎草本植物を対象として試験を実施したが、芝等の根毛を主体とする浅い深度に根を張る植生を対象とした検討と比較は今後の検討課題である。また、その際は根茎による透水係数の増加によって生じる安全性低下についてもあわせて検討を行いたい。

参考文献

- 1) 国土交通省河川砂防技術基準 維持管理編（河川編）, 2013
- 2) 光原圭祐, 弓削こずえ, 中野芳輔：植物根が土壌の保水性・透水性に及ぼす影響, 第19回農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp348-349, 2007
- 3) 鈴木素之, 山本哲朗, 枇杷雄介：根系を含む土の一面せん断強度特性, 第39回地盤工学会研究発表講演集, 地盤工学会, pp843-844, 2004
- 4) 宗岡寿美ほか：草本植生根系を含む土供試体のせん断特性と植生密度の検討, 第17年度農業土木学会大会講演要旨集, pp826-827, 2005
- 5) 遠藤泰造, 鶴田武雄：樹木の根がせん断強さにあたえる作用（第1報）, 林業試験場北海道支場年報, pp167-182, 1969
- 6) 阿部和時：土のせん断抵抗力と根系分布量の関係, 第95回日本林学会論文集, pp595-596, 1984
- 7) 久楽勝行, 三木博史, 関一雄：締固め度がレキ混り粘性土の工学的性質に及ぼす影響（第2報）, 土木技術資料24-3, 1982
- 8) 荻住昇：新装版樹木根系図説, 誠文堂新光社, 1972
- 9) 森啓年, 荒金聡, 齋藤由紀子, 佐々木哲也, 服部敦：堤防被災原因調査について, 雑誌河川2010年2月号, pp71-77, 2010 (2014. 4. 3受付)