

X線CTスキャンを活用した 土の侵食抵抗試験に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON EROSION RESISTANCE TEST OF SOIL USING X-RAY CT SCAN

中陳実咲希¹・中村 大²・川口貴之³・川尻峻三⁴・山下 聡⁵・山口滉平⁶

Misaki NAKAJIN, Dai NAKAMURA, Takayuki KAWAGUCHI,
Shunzo KAWAJIRI, Satoshi YAMASHITA and Kohei YAMAGUCHI

¹学生会員 北見工業大学博士前期課程1年 社会環境工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²正会員 博(工) 北見工業大学准教授 地球環境工学科 (同上)

³正会員 博(工) 北見工業大学准教授 地球環境工学科 (同上)

⁴正会員 博(工) 北見工業大学准教授 地球環境工学科 (同上)

⁵正会員 博(工) 北見工業大学教授 地球環境工学科 (同上)

⁶学生会員 北見工業大学博士前期課程2年 社会環境工学専攻 (同上)

In this study, the test equipment was manufactured by applying the sprayer, and the erosion resistance test was carried out. X-ray CT scan was used for interpretation of the test results, and not only the development state of the root system in the test specimen was grasped, but X-ray CT scan was also carried out after the test to determine the erosion depth and erosion rate.

The test results revealed that the erosion resistance increased as the root system developed. In addition, the root system quantity and erosion depth obtained from the X-ray CT scan image of the test specimen had a negative correlation, and it was found that the X-ray CT scan was useful as one of the methods for grasping the influence of the root system on the erosion resistance of soil.

Key Words : Erosion resistance test, X-ray CT scan, soil, root system, river embankment

1. はじめに

近年、我が国ではゲリラ豪雨や台風に伴う集中豪雨が多発しており、河川堤防の決壊といった大規模な水害の発生頻度が高くなっている。このような大規模な水害は北海道においても増加傾向にあり、平成28年8月北海道豪雨災害では堤防の決壊に加えて橋梁の損壊等が発生し、甚大な被害を受けた¹⁾。近年の地球温暖化に伴う急激な気候変動を鑑みると、北海道の河川堤防も本州同様に豪雨による侵食や崩壊、越水による決壊等の危険性が年々高まっており、豪雨に対する耐力を向上させていくことは喫緊の課題であると言える。

一般的に、堤防にはのり面保護工として、植物を繁茂させることで根系を侵入させ、表層地盤を補強する植生工が用いられる。植生工には豪雨時の雨滴侵食によるのり面表層の断面欠損防止効果や、洪水時の川表のり面の侵食抑制効果、越水時の川裏のり面の侵食遅延効果等が

期待される。このため、古くから原位置実験や水路実験で、のり面緑化された堤防の流水に対する侵食抵抗の把握が試みられてきた(例えば、福岡ら²⁾)。しかしながら、植生工の侵食防止効果を定量的に評価する統一的な手法が確立されていないこともあり、植生工でどの程度の降雨や流水に耐えることができるのかといった基本的な疑問も多く存在する。さらに、積雪寒冷地の堤防は寒気に曝されるため、凍結融解履歴が植生工の補強効果に強い影響を与えると考えられるが、これを明らかにした研究事例は筆者が調べた限り存在しない。

そこで本研究では、植生工が有する侵食防止効果、さらにはこれに与える凍結融解履歴の影響について明らかにすることを最終目的として、植物根系を含む供試体を用いた侵食抵抗試験方法について検討することに取り組んだ。ここではその足掛かりとして、過去の洗掘抵抗試験に関する学会基準³⁾を参考に、市販の噴霧器を応用した試験装置を作製し、豪雨時の雨滴侵食を想定した侵食抵抗試験を実施した。具体的な試験方法は、草本植物に

表-1 試験条件

土質	ケース	供試体の種類	供試体名
火山灰質砂質土	1	土供試体	S-1~2
	2	根系含有土供試体	S-KBG1~5
火山灰質粘性土	3	土供試体	C-1~2
	4	根系含有土供試体	C-KBG1~5

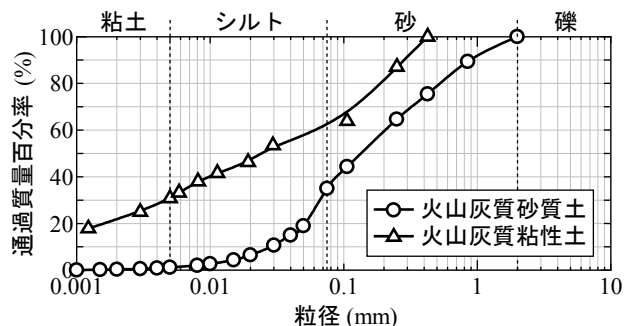


図-1 粒径加積曲線

ケンタッキーブルーグラス（KBG）を用い、土質や根系量が異なる多くの供試体を作製し、供試体上端面に直角方向の水流を与えて侵食抵抗を求めるというものである。さらに、本研究ではX線CTスキャンを活用しており、供試体中の根系の発達状況（主に根系量）を試験前に把握するだけでなく、試験後にもX線CTスキャンを実施して、得られた画像から侵食深や侵食速度を求めるとともに、根系を含む供試体がどのように侵食されていくのか非破壊で観察することに取り組んだ。

2. 試験条件と方法

表-1は本研究の試験条件をまとめたものである。試験には火山灰質砂質土（以下、砂質土）と火山灰質粘性土（以下、粘性土）の2種類の土を使用し、各2ケースずつ、合計4ケースの試験を行った。供試体は大きく2種類に分けられ、一つは根系を含まない供試体（以下、土供試体）と、もう一つはこれに播種して根系を発達させた供試体（以下、根系含有土供試体）である。土供試体は各ケース2供試体ずつであるが、根系含有土供試体は再現性を確認するために各ケース5供試体ずつ用意した。なお、表中の供試体名については、砂質土にはS、粘性土にはC、根系含有土供試体にはKBGを付した。

(1) 土供試体の作製方法

図-1は本研究に用いた土試料の粒径加積曲線である。砂質土は2 mmふるい、粘性土は0.425 mmふるい通過分を使用した。表-2は各土試料の物性値、表-3は土供試体の作製条件をまとめたものである。播種の有無にかかわらず、全ての供試体は含水比 w に調整した土試料を、所定の湿潤密度 ρ_t と層厚になるよう1層当たりの質量を計算してモールド内に投入し、全断面ピストンをプラス

表-2 土試料の物性値

土質	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	最適含水比 w_{opt} (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)
火山灰質砂質土	2.437	30.6	1.23
火山灰質粘性土	2.557	28.0	1.43

表-3 土供試体の作製条件

土質	含水比 w (%)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)
火山灰質砂質土	31.0	1.37
火山灰質粘性土	30.0	1.58

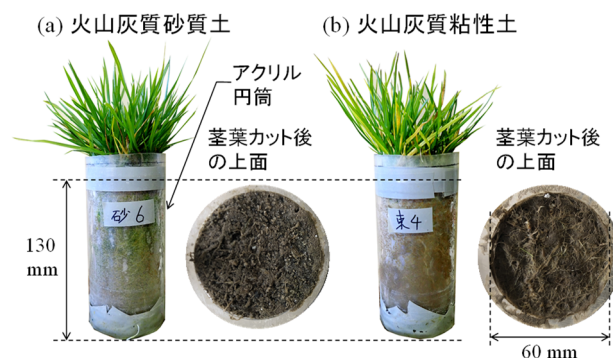


図-2 根系含有土供試体の一例

チックハンマーで打撃することで作製した（締固め度 $D_c \approx 85\%$ ）。なお、供試体は直径60 mm、高さ130 mmの円柱形であり、層厚は下から6層を20 mm、上1層を10 mmとし、根系含有土供試体については、根系が侵入し易いよう上1層（上端面から10 mm）だけを幾分攪拌した。

(2) 根系含有土供試体の作製方法

図-2は本研究に用いた根系含有土供試体の播種から3カ月後の様子である。播種した草本植物は、耐寒性に優れるために北海道での使用頻度が高いケンタッキーブルーグラスである。種子は攪拌した土供試体の上端面に播いており、播種量は19.77 g/m²（平均150粒）とした。これは発生期待本数を5,000本/m²（北海道開発局の設定を参考）とし、種子の発芽率、単位粒数、純度等を考慮して算出したものである。ただし、土供試体と根系含有土供試体の侵食抵抗に明確な差が出るように、実際の植生工の仕様に比べて幾分過大な量とした。以上の方法で土供試体に播種した根系含有土供試体は、アクリル円筒に移して底面にろ紙を敷設し、底部に多孔板を設置したコンテナ内に静置した。コンテナは降雨を遮るための透明なビニールシートで覆い、屋外に設置して植物を生育させた。また、供試体底面から約10 mmは常に水浸させており、土と植物の乾燥具合を考慮して、水を適宜噴霧した。生育期間は2018年9月上旬～11月下旬までの約3カ月である。根系含有土供試体は屋外で植物を生育させた後、ラップフィルムで包んで遮光された室内で保管しており、室内保管日数は保有する試験装置の稼働状況等の都合上、供試体ごとに異なっている。なお、茎葉部については試験直前に根本でカットした（図-2参照）。

表-4 根系含有土供試体の生育条件, 草丈, 発芽数, 根系乾燥質量

土質	ケース	供試体名	植物生育期間	生育日数 (d)	試験日	室内保管日数 (d)	積算温度 (°C・day)	積算日照時間 (h)	草丈 (mm)	発芽数 (本)	根系乾燥質量 (g)
火山灰質砂質土	2	S-KBG1	2018/9/4 ~11/26	83	12/6	10	846	144	90	92	0.800
		S-KBG2	2018/9/4 ~11/26	83	12/27	31	846	144	110	68	1.140
		S-KBG3	2018/9/4 ~11/26	83	1/22	57	846	144	120	40	0.519
		S-KBG4	2018/9/4 ~11/26	83	1/23	58	846	144	115	30	0.238
		S-KBG5	2018/9/11~11/26	76	2/7	73	707	134	86	67	0.245
火山灰質粘性土	4	C-KBG1	2018/9/4 ~11/26	83	12/12	16	846	144	113	63	0.580
		C-KBG2	2018/9/4 ~11/26	83	12/20	24	846	144	100	64	0.910
		C-KBG3	2018/9/4 ~11/26	83	1/23	58	846	144	97	31	0.819
		C-KBG4	2018/9/11~11/26	76	2/1	67	707	134	59	61	0.463
		C-KBG5	2018/9/4 ~11/26	83	2/7	73	846	144	110	65	0.964

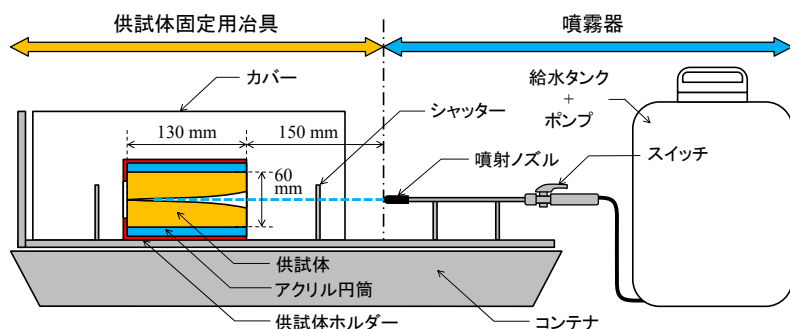


図-3 侵食抵抗試験装置の模式図

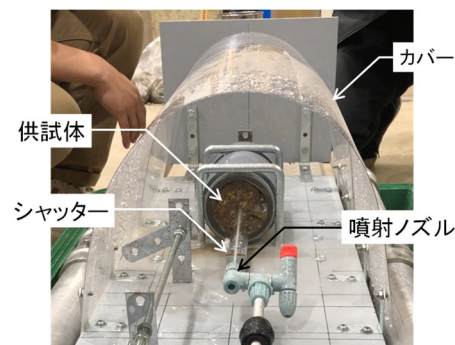


図-4 侵食抵抗試験の様子

表-4は根系含有土供試体の生育条件, 発芽数, 根系乾燥質量等をまとめたものである。表中の積算温度等の気象環境条件はアメダス北見の気象データ⁴⁾から算出したものである。発芽数は茎の本数を数えたものであり, 根系乾燥質量はせん断試験後の供試体から根系のみを慎重に採取して計量したものである。

(3) 侵食抵抗試験およびX線CTスキャン

図-3は過去の洗掘抵抗試験に関する学会基準³⁾を参考に作製した侵食抵抗試験装置の模式図である。本試験装置は噴射ノズル, 給水タンク, ポンプが一体となった市販の電動式噴霧器(最大容量7 L)と, 供試体固定用治具からなる。本研究で市販の噴霧器を採用した理由は, 手軽に高い水圧の水流を発生させられるだけでなく, 将来的に実際の河川堤防において本研究と同様の侵食抵抗試験を原位置で実施することを想定しているためである。使用した噴霧器は最大噴霧量0.68 L/minの吐出能力を持ち, 噴霧圧力0.26 MPaの一定水圧で連続した吐出水を得ることが可能である。噴射ノズル先端の内径は0.9 mmであり, 水を供試体上端面に対して直角に, ストレートで噴射して侵食を発生させた。噴射ノズル先端から侵食前の供試体上端面までの距離は, シャッターを挟んで150 mmである。噴射継続時間は供試体ごとに異なるが, これは土質の違いや根系の有無に起因して, 侵食速度が大きくばらついたためである。また, 試験開始時は給水タンクを最大容量の7 Lまで水で満たし, 常に一定の圧力で水が噴射されるよう工夫した。なお, 試験終了後に使用した水量を計量して, 噴射ノズルからの平均流速を求

めたところ, 18 m/sであった。

図-4は実際の侵食抵抗試験の様子である。具体的な試験方法は, まず供試体をアクリル円筒ごと供試体ホルダーに設置する。次に, シャッターを立てて供試体に水流が当たらないようにした後, 噴射ノズル先端の流速が一定となるまで10秒間噴射させる。その後, シャッターを倒し, 水流を供試体上端面に任意の時間継続して衝突させ, 侵食を発生させる。以上の試験を繰り返し行い, 試験後にX線CTスキャンを行うことで, 供試体内の侵食状況を非破壊で観察し, 得られた画像から侵食深や侵食速度を求めた。

表-5はX線CTスキャン条件をまとめたものである。解像度に相当するボクセルサイズは0.132 mmとした。使用した装置はSHIMADZU inspeXio SMX-225CTである。

3. 試験結果および考察

(1) 侵食抵抗試験

図-5は侵食抵抗試験前および試験後に実施したX線CTスキャンから得られた土供試体(図-5(a), (b))および根系含有土供試体(図-5(c), (d))の供試体中心を通る縦断面画像である。各ケースの代表的なものを一例ずつ(紙面の都合上4つずつ)示しており, 試験前から順に時系列で並べた。なお, 本研究では全ケースで, ある時点(図-6で詳述する屈折点)を境に侵食速度が変化しており, 左から2つ目は屈折点の画像, 3つ目はこの後(侵食速度低下後)の画像である。また, この画像では高密

表-5 X線CTスキャン条件

管電圧 (kV)	管電流 (μA)	画素数	ビュー数	積算枚数
160	40	512×512	1,200	12

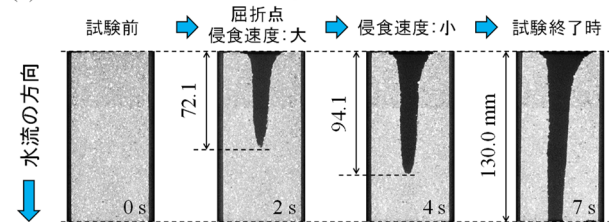
度部（主に土）が灰色、低密度部（主に侵食でできた空洞部分）が黒色で示されており、各縦断面画像中で黒色部分が最も深く侵入した箇所を侵食深として読み取った。まず、土供試体を見ると、侵食は水流に対して平行に真直ぐ進んでおり、最終的に貫通していることがわかる。侵食幅は粘性土の方が砂質土に比べて広いことが確認できた。これは、粘着力が無い砂質土では水流で砂粒子が移動し易く（侵食抵抗が小さく）、直進性が卓越するのに対して、粘着力が大きい粘性土では土粒子が移動し辛く（侵食抵抗が大きく）、侵食孔底面で跳ね返った水が侵食孔側壁を削るためだと考えられる。次に、根系含有土供試体を見ると、侵食は試験初期において直進しているものの、ある深さに達すると供試体直径方向に広がっていることがわかる。根系含有土供試体では土質によらず、全ての供試体で侵食による貫通は発生しなかった。これは、土質の違いに関わらず、根系によって土が増強されたためだと考えられる。また、砂質土では侵食孔底面で跳ね返った水で侵食孔側壁が削られているが、粘性土では側壁の侵食も極僅かにしか発生していない。

本研究で作製した根系含有土供試体は、上端面を根系が覆っており（図-2参照）、侵食深を目視観察することは困難であった。X線CTスキャンを用いることで、土中に形成された複雑な形状の侵食孔を非破壊で詳細に観察することができ、X線CTスキャンが侵食挙動を把握する手段として有効であることが確認できた。

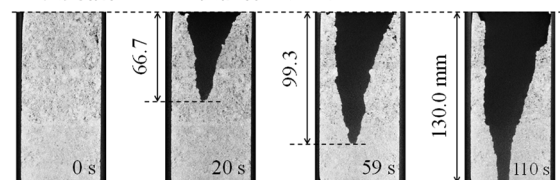
図-6は図-5から読み取った侵食深の経時変化である。ここでは、土供試体は各土質1供試体ずつ、根系含有土供試体は各土質2供試体ずつ、例として示す。まず、根系の有無で比較すると、根系含有土供試体は土供試体に比べて、侵食に要する時間が明らかに長い。このことから植物根系が土の侵食抵抗を増加させていると理解できる。また、土質の違いで比較すると、土供試体、根系含有土供試体ともに、砂質土に比べて粘性土の方が侵食に要する時間が長いことも確認できる。次に、粘性土の根系含有土供試体における侵食深の経時変化に着目すると、C-KBG2では侵食深が約31 mmに達した時点で屈折していることがわかる。この屈折点は侵食が進まなくなった深さと考えられることから、本研究ではこの深さを最大侵食深と定義して読み取った。また、屈折点より前の侵食深の傾きを最大侵食速度、後の傾きを最小侵食速度として求めている。なお、C-KBG4のように屈折点が2点となる場合は、2点目を最大侵食深として読み取った。

表-6は本研究で実施した侵食抵抗試験結果をまとめたものである。上述の屈折点は土質の違いや根系の有無によらず、全ての供試体で確認できたが、侵食で貫通した土供試体は最大侵食深を130 mmとして整理した。

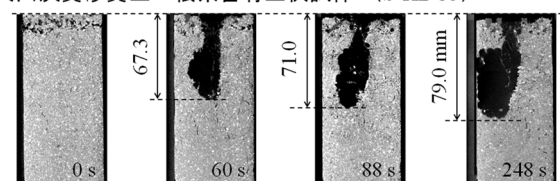
(a) 火山灰質砂質土・土供試体 (S-1)



(b) 火山灰質粘性土・土供試体 (C-1)



(c) 火山灰質砂質土・根系含有土供試体 (S-KBG3)



(d) 火山灰質粘性土・根系含有土供試体 (C-KBG2)

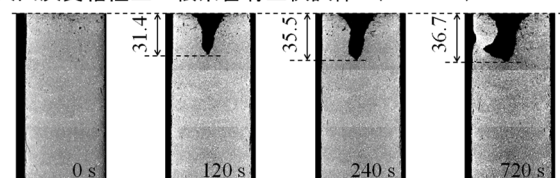


図-5 侵食抵抗試験における供試体の縦断面画像

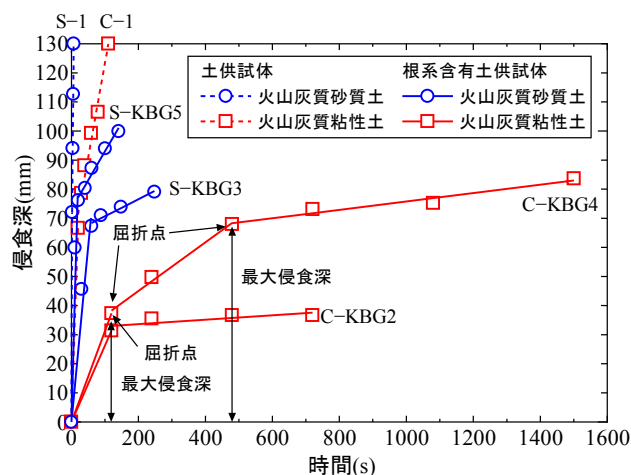


図-6 侵食深の経時変化

図-7(a)は最大侵食深と根系乾燥質量、図-7(b)は発芽数との関係をプロットしたものである（根系乾燥質量と発芽数については表-3を参照）。図中には全試験結果を近似した直線も示している。根系乾燥質量および発芽数と最大侵食深との間に負の相関関係が認められることから、緑化植物の生育具合や土中に発達した根系量が土の侵食抵抗に直接的な影響を与えていることが窺える。なお、最大侵食深との相関は外観から確認できる発芽数の方が根系乾燥質量に比べて強い。これは根系乾燥質量が

表-6 侵食抵抗試験結果一覧

土質	ケース	供試体名	最大侵食深 (mm)	侵食速度 (mm/s)	
				最大	最小
火山灰質 砂質土	1	S-1	130.0	34.663	11.820
		S-2	130.0	46.034	4.351
	2	S-KBG1	40.7	7.375	0.424
		S-KBG2	28.3	0.947	0.057
		S-KBG3	67.3	1.201	0.059
		S-KBG4	90.2	1.446	0.570
		S-KBG5	76.2	4.206	0.198
火山灰質 粘性土	3	C-1	130.0	3.365	0.649
		C-2	130.0	5.023	0.714
	4	C-KBG1	11.4	0.479	0.009
		C-KBG2	31.4	0.262	0.008
		C-KBG3	93.5	0.300	0.003
		C-KBG4	68.0	0.312	0.014
		C-KBG5	32.7	0.127	0.012

供試体全体から採取したものであり、侵食に抵抗しないアクリル円筒の内壁と供試体側面の境界に発達した根系も含まれているためと推測される。そこで、以下ではX線CTスキャンを活用して供試体中のみに発達した根系を抽出し、その量の定量化を試みた。

(2) X線CTスキャンを活用した根系発達状況の定量化

図-8はX線CTスキャンで得られた断面画像を、解析ソフト (ExFact VR2.1⁵⁾) で3次元再構成した例である。本研究では供試体全体に対してX線CTスキャンを実施したが、関心領域は供試体側面に発達した根系が含まれないように、供試体よりも幾分小さい直径55 mm、高さ127.7 mmに設定した。この画像では根系を黒色、それ以外を無色透明で表示している。このような3次元再構成画像を作成するため、本研究では根系とそれ以外 (主に土粒子) の部分を大局的に分離する閾値を奥村ら⁶⁾が提案する手法を参考にして決定した。具体的には、川尻ら⁷⁾が行ったように解析ソフトでX線吸収量を示すGL (Gray Level) 値のヒストグラムを出力し、主として根系からなるGL値の分布と、それ以外からなるGL値の分布がそれぞれ正規分布を呈すると仮定して、この正規分布同士との交点を両者の閾値とした。

図-9は図-8の3次元再構成画像を元に、先述の解析ソフトのボイド解析オプションを用いて、根系を3次的に抽出した画像である。本研究では根系を空隙とみなして、Region Growing法⁸⁾を適用して根系の抽出を行っており、この画像から関心領域中に存在する根系の総体積を求めている。色の違いは複雑な形状を呈する空隙を球で置き換えた場合の直径 (有効直径) に対応している。各土質2供試体ずつ示しており、最大侵食深は左側にある供試体の方が小さい。残念ながら抽出できていない細い根系も存在するものの、図-8で目視確認できる根系の傾向は十分に表現できていると考えられる。各画像において根系部分を比較すると、図-9(a)、(b)でそれぞれ左側にある供試体の方が含有する根系量が明らかに多いこと

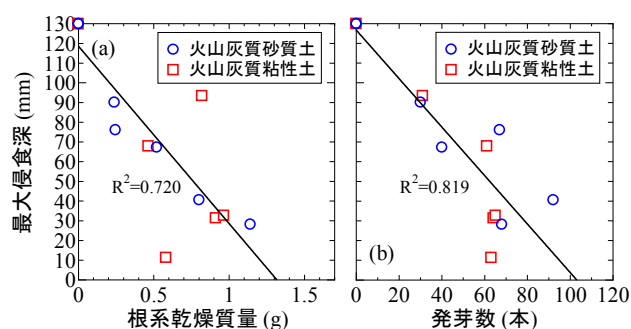


図-7 最大侵食深と(a)根系乾燥質量、(b)発芽数の関係

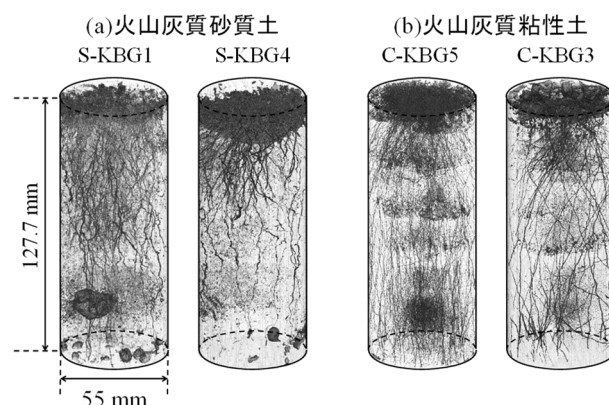


図-8 根系含有土供試体の3次元再構成画像

がわかる。また、砂質土では有効直径1.5 mm以上の太い根系が幾分多く見受けられるが、根系の侵入深は粘性土に比べて明らかに小さい。一方、粘性土では1.5 mm未満の細い根系が多く見受けられる。さらに、供試体上端面付近の根系密度が大きく、放射状に伸びた根系が底面にまで発達していることも確認できる。

図-10は最大侵食深と関心領域中に含まれる総根系体積の関係をプロットしたものである。図中には全試験結果を近似した直線も示している。総根系体積と最大侵食深との間には、根系乾燥質量や発芽数と同様に、負の相関関係が認められる。また、侵食抵抗に影響を与えると考えられる根系のみを抽出したことで相関性が高くなっており (0.720→0.798)、土中に発達した根系量を把握する手段としてX線CTスキャンが有効であることが確認できた。さらに、本研究では最大侵食深が土質によらず、根系量のみによって一義的に決まることが推察される試験結果が得られたが、この点については異なる土質での試験や、生育期間にばらつきを持たせた試験を実施して、根系量の影響についてより詳細に検討していきたいと考えている。

図-11(a)は最大侵食速度と総根系体積、図-11(b)は最小侵食速度との関係をプロットしたものである。最大・最小侵食速度はともに総根系体積が大きくなるに従って減少しており、根系が発達した供試体ほど侵食抵抗が増大していることがわかる。これは根系が土そのものを増強していることに加え、根系が水流に抵抗し、流速を減衰させているためと推察できる。

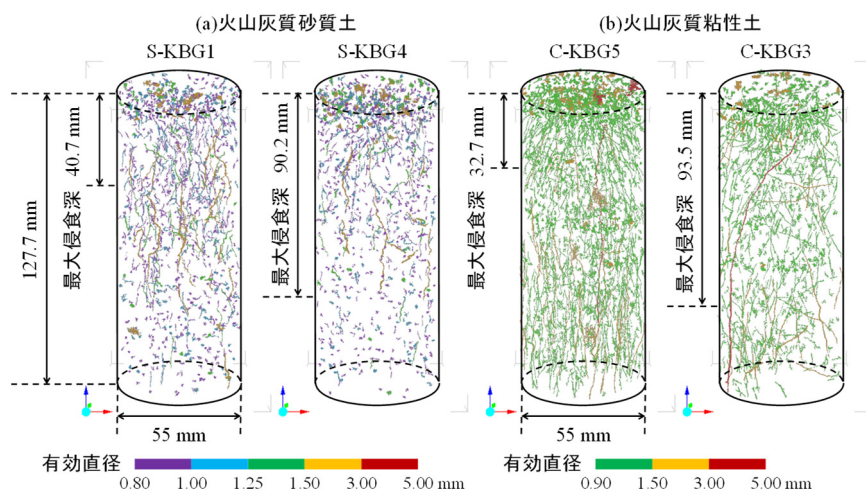


図-9 根系含有土供試体 (a)火山灰質砂質土, (b)火山灰質粘性土) の根系抽出画像

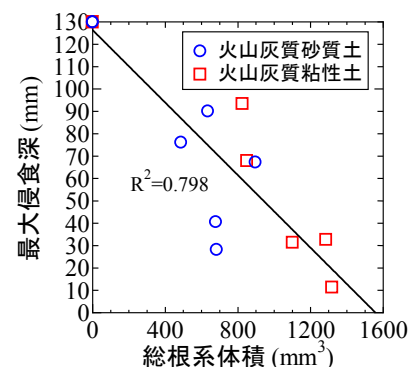


図-10 最大侵食深と
総根系体積の関係

4. まとめ

本研究では噴霧器を応用して試験装置を作製し、豪雨時の雨滴侵食を想定した侵食抵抗試験を実施した。試験結果の解釈にはX線CTスキャンを活用しており、供試体中の根系の発達状況を把握するだけでなく、試験後にもX線CTスキャンを実施して、侵食深や侵食速度を求めることに取り組んだ。得られた知見を以下にまとめる。

植物根系を含まない供試体では侵食は水流に対して平行に直進し、根系が発達した供試体ではある深さに達すると侵食が進まなくなり、供試体直径方向に広がるのがわかった。X線CTスキャンを用いることで、土中に形成された複雑な形状の侵食孔を非破壊で詳細に観察することが可能となった。

植物根系が発達した供試体では、これに含まない供試体に比べて侵食に要する時間が明らかに長く、最大侵食深も小さくなったことから、根系が土の侵食抵抗を増加させていることが明らかとなった。また、侵食抵抗は根系含有量が増加するに従って、増大することもわかったが、これはボイド解析による根系抽出画像から得られた供試体中の根系含有量と、侵食抵抗の大きさに相関が認められたことから確認が得られた。以上のように、X線CTスキャンが供試体中の根系の発達状況を把握する手段や、土の侵食抵抗に及ぼす根系の影響を把握する手段として、極めて有用であることが確認できた。

最後に、本研究で実施した試験方法によって、植物根系を含む土の雨滴に対する侵食抵抗をある程度定量的に評価できるようになったと考えられる。今後は凍結融解履歴の影響についても明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 渡邊康玄, 早川博, 川口貴之, 川尻峻三, 宮森保紀: 2016年8月常呂川水における構造物等の被災状況調査, 河川技術論

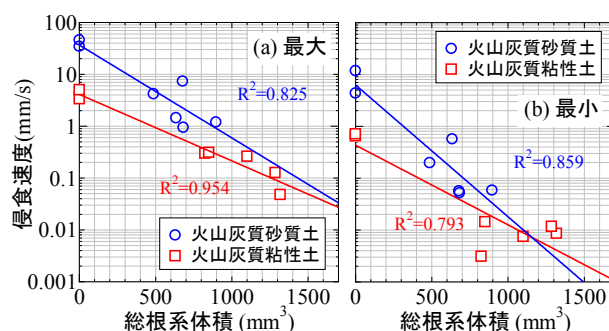


図-11 (a)最大侵食速度, (b)最小侵食速度と
総根系体積の関係

文集, 第23号, pp.31-36, 2017.

- 2) 福岡捷二, 渡辺和足, 柿沼孝治: 堤防芝の流水に対する侵食抵抗, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.21-40, 1994.
- 3) 土木試験法(第2回改訂版): 社団法人土質工学会, pp7-4-18, 1979.
- 4) 気象庁: “過去の気象データ検索”, 気象庁ホームページ, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照: 2019年3月29日)
- 5) 日本ビジュアルサイエンス株式会社: ExFact VR ユーザーズマニュアル, 143 pp, 2017.
- 6) 奥村真彦, 滝克彦, 齊藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之: CTヒストグラムに基づく複合材料の大局的構造評価法の検討, 日本金属学会誌, Vol.79, No.10, pp.497-503, 2015.
- 7) 川尻峻三, 田中政典, 川口貴之, 猶原有希子, 平林弘, 中村大, 山下聡: X線CTスキャンによるベンセン断試験時のせん断機構の解釈, 地盤工学ジャーナル, Vol.12, No.1, pp.79-90, 2017.
- 8) Higo, Y., Oka, F., Sato, T., Matsushima, Y. and Kimoto, S., Investigation of localized deformation in partially saturated sand under triaxial compression by microfocus X-ray CT with digital image correlation, *Soils and Foundations*, Vol. 53, No. 2, pp.181-198, 2013.

(2019. 4. 2受付)