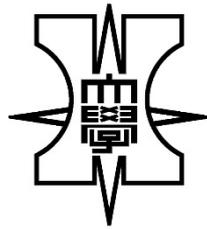


博士論文

X線CTを活用した植物根系による
のり面の補強効果に関する基礎的研究



2019年3月

SONG BAIYANG

目 次

第1章 序 論.....	1
1.1 研究背景.....	2
1.1.1 のり面・斜面の崩壊とその要因	2
1.1.2 積雪寒冷地におけるのり面の崩壊機構	4
1.1.3 のり面保護工	6
1.1.4 寒冷地における植生工の被災	8
1.2 既往の研究.....	10
1.2.1 積雪寒冷地におけるのり面の動態観測	10
1.2.2 植物根系を含む土の強度特性に関する既往研究	11
1.3 本研究の目的と方法.....	13
1.4 本論文の構成.....	14
第1章の参考文献.....	16
第2章 寒冷地で発生した極表層をすべり面とする斜面崩壊の調査.....	17
2.1 調査概要.....	18
2.1.1 表層崩壊発生時の気象状況	18
2.1.2 調査対象箇所の概要	19
2.1.3 崩壊箇所の土質構成	20
2.1.4 採取した土試料の土質試験結果	21
2.1.5 簡易動的コーン貫入試験	22
2.1.6 採取した不攪乱試料	23
2.2 定圧一面せん断試験.....	24
2.2.1 供試体の作製	24
2.2.2 試験装置および試験方法	25
2.2.3 定圧一面せん断試験結果および考察	27
2.3 斜面安定解析.....	30
2.4 まとめ.....	34
第2章の参考文献.....	35

第3章 X線CTスキャンを活用した凍上過程における土の内部観察.....	37
3.1 X線CTスキャンの地盤工学分野への活用.....	38
3.2 凍上現象.....	39
3.2.1 凍上機構.....	39
3.2.2 凍上の3要素.....	40
3.2.3 凍上理論.....	41
3.3 実験概要.....	43
3.3.1 供試体の作製.....	43
3.3.2 凍上実験装置.....	45
3.3.3 X線CTスキャン.....	46
3.4 実験結果および考察.....	51
3.4.1 凍上量, 吸水量および温度の経時変化.....	51
3.4.2 凍上過程における土の内部観察.....	52
3.5 まとめ.....	56
第3章の参考文献.....	57
第4章 凍結融解履歴を受けた植物根系を含む土のせん断特性に関する基礎的研究.....	59
4.1 実験概要.....	60
4.1.1 供試体の作製.....	61
4.1.2 凍結融解試験.....	62
4.1.3 簡易定圧一面せん断試験.....	63
4.1.4 X線CTスキャン.....	65
4.2 実験結果及び考察.....	66
4.2.1 凍結融解試験.....	67
4.2.2 簡易定圧一面せん断試験結果及び考察.....	68
4.2.3 X線CTスキャン.....	71
4.3 まとめ.....	73
第4章の参考文献.....	74

第5章 ケンタッキーブルーグラスの根系が土のせん断強度に与える影響.....	75
5.1 実験概要.....	76
5.1.1 土供試体の作製.....	77
5.1.2 根系含有土供試体の作製.....	77
5.1.3 凍結融解試験.....	80
5.1.4 一面せん断試験.....	81
5.1.5 X線CTスキャン.....	82
5.2 実験結果及び考察.....	83
5.2.1 一面せん断試験.....	83
5.2.2 発芽数および根系乾燥質量.....	85
5.2.3 X線CTスキャン.....	86
5.3 まとめ.....	94
第5章の参考文献.....	95
第6章 結 論.....	97
6.1 寒冷地で発生した極表層をすべり面とする斜面崩壊の調査.....	98
6.2 X線CTスキャンを活用した凍上過程における土の内部観察.....	99
6.3 凍結融解履歴を受けた植物根系を含む細粒土のせん断特性に関する基礎的研究.....	100
6.4 ケンタッキーブルーグラスの根系が細粒土のせん断強度に与える影響.....	100
謝 辞.....	103

第 1 章 序 論

1.1 研究背景

1.1.1 のり面・斜面の崩壊とその要因

一般的に、盛土工または切土工によって人工的に形成された土または岩からなる斜面をそれぞれ盛土のり面および切土のり面といい、これらを総称して「のり面」という。のり面には造成地や道路、堤防などがあるが、本研究では主に、道路土工によって形成された斜面を対象としている。これに対して、地山のままの自然斜面を指して「斜面」という¹⁾。のり面・斜面ともに、降雨や地震といったイベントによって崩壊が発生して災害となることがあるが、地震を別にする²⁾と、降雨や融雪などに伴う地下水の増加が主な崩壊原因であることが多い。

表 1-1 はのり面・斜面を不安定化し崩壊に至らせる要因についてまとめたものである²⁾。のり面・斜面に関わらず、地表面が傾斜した土構造物の場合、土は重力などの作用を受けて、高い部分から低い方へと移動しようとし、構造物内部にはせん断応力が働く。このとき、土中に生じたせん断応力がせん断強さを超えなければ斜面は安定な状態を保つが、土中の連続した面に沿って作用するせん断応力がせん断強さを超えてしまうと、その面をすべり面として斜面に崩壊が発生してしまう。このような崩壊を起こす原因としては、上述の重力の以外にも、浸透水の力や地震力などをあげることができる。しかしながら、のり面・斜面崩壊を引き起こす原因を明らかにすることは困難であり、表 1-1 にあげた要因が複合的に働いたと考える場合が多い。

のり面・斜面崩壊は一般的に、その崩壊規模や形態から表層崩壊と深層崩壊（道路土工指針では深い崩壊、地すべり性崩壊）の大きく 2 つ分けて区分される^{1), 3)}。このうち、表層崩壊は難透水性の地層の上に砂質土や崖錐堆積物が堆積しているような場合や固結度の低い地層の場合に、豪雨等に伴う浸透水が原因となって発生する深さ 2 m 程度以下の浅い崩壊をいう。他方、深層崩壊は崖錐堆積物の層厚が非常に厚い場合や粘性土層および砂質土層の互層からなる洪積地盤の場合に、降雨による地下水位の上昇をきっかけとして発生する大規模な地すべりを指す。深層崩壊は発生頻度が表層崩壊に比べて極めて少なく、これを予測することは非常に困難である。日本においては毎年の台風性の豪雨および前線性の長雨が誘因となって表層崩壊の発生が多いことから、表層崩壊の予知

や予測，その防止に関する研究が多く行われてきた（例えば Srikrishnan Siva Subramanian ら⁴⁾）。ただし，のり面・斜面の表層崩壊は豪雨等に伴って突発的に発生するため，その予測は非常に難しく，工事中だけでなく，工事完成後であっても，人命に関わる大きな災害に繋がってしまうことも稀ではない。また，崩壊土砂が道路内に流入し，表層崩壊が定期的な交通状況に影響することも多々ある。

近年の地球温暖化に伴う急激な気候変動によって，日本ではのり面・斜面崩壊，特に表層崩壊が，ゲリラ豪雨や台風に伴う集中豪雨といった強烈な降雨イベントの間，またはその後に頻繁に観察されている。北海道においてもこのような災害は増加傾向にあり，平成28年8月北海道豪雨災害では観測史上初めて1週間に3個の台風が上陸して記録的な豪雨となり，国道において土砂崩れなどが発生し，甚大な被害がもたらされた。これに加え，北海道のような積雪寒冷地におけるのり面では，冬期の凍上現象や凍結融解作用，春期の融雪水の影響を受けて崩壊に至ることがよく知られている。北海道での調査によると，切土のり面の崩壊原因のうち，凍上現象や凍結融解が全体の約40%にまで達するという報告もあり⁵⁾，積雪寒冷な環境がのり面・斜面の安定性に大きく影響を与えていることがわかる。

表 1-1 斜面を不安定化する要因²⁾

土中のせん断応力を増大する要因	土のせん断強さを減少する要因
1.外力の作用	1.吸水による粘土の膨張
2.含水量が増したため土の単位体積重量の増加	2.不安定の土中に生じるひずみと緩慢に起こる崩壊
3.掘削による土の一部の除去	3.土の締めり方の不十分
4.人工または自然力による地下空洞の形成	4.収縮・膨張または引張りによって生じる微細な割れ目
5.地震・爆破などによる振動	5.間隙水圧の作用
6.引張り応力による割れ目の発生	6.凍土やアイスレンズの融解
7.割れ目の中に動く水圧	7.結合材の性質の劣化
	8.緩い粒状の土の振動

1.1.2 積雪寒冷地におけるのり面の崩壊機構

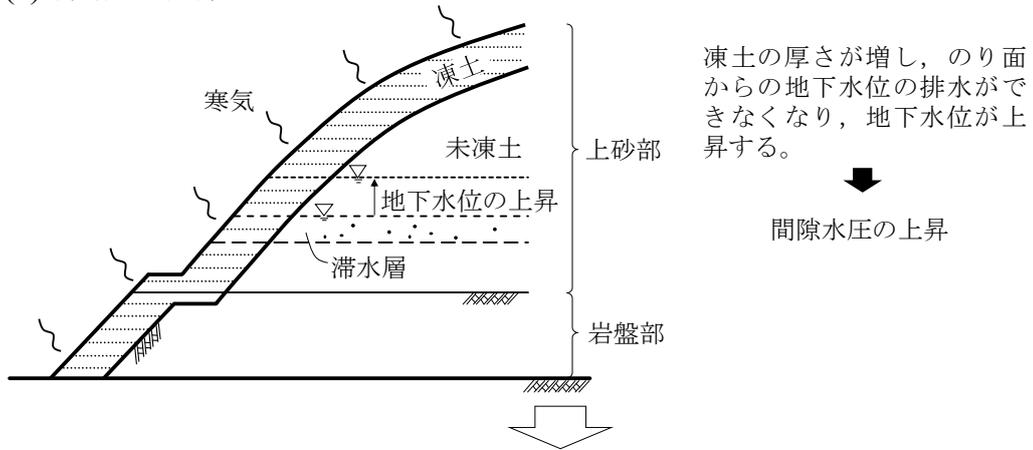
積雪寒冷地におけるのり面・斜面は、冬期間の凍上現象や凍結融解作用、さらに春先の融雪水の影響といった「寒冷地特有の要因」で崩壊に至ることがある。ここでは、地盤工学会北海道支部がまとめた「寒冷地地盤工学—凍上被害とその対策—」⁶⁾を参考に、寒冷地におけるのり面の崩壊機構について詳述する。

図 1-1 は寒冷地におけるのり面の代表的な崩壊機構について示した模式図である。冬期、寒気によって凍結線 (0°C 線) がのり面表層から内部に移動すると、表層部分が凍結し、凍土が形成される (図 1-1(a))。凍土の厚さは凍結線の進行に伴って増加するが、厚く発達した凍土層はのり面内の水分の排出を妨げる遮水層となる。のり面背面に地下水の供給がある場合、水分は逃げ場を失った状態となって地下水位が上昇し、のり面内部では間隙水圧が上昇する。春期になると、のり面に形成された凍土層は温度上昇に伴って表層から融解し始める (図 1-1(b))。この融解の段階においては凍土がある程度の厚さを保持しているために崩壊には至らないが、融解が進むとのり面は 2 種類の機構で崩壊に至る。一つは比較的浅い深さの位置 (凍結深以内) で表層部分が流動してのり面に変状や崩壊が発生するものであり、もう一つは地下水とともに斜面がえぐれた状態になり比較的深い位置からの崩壊に至るものである。

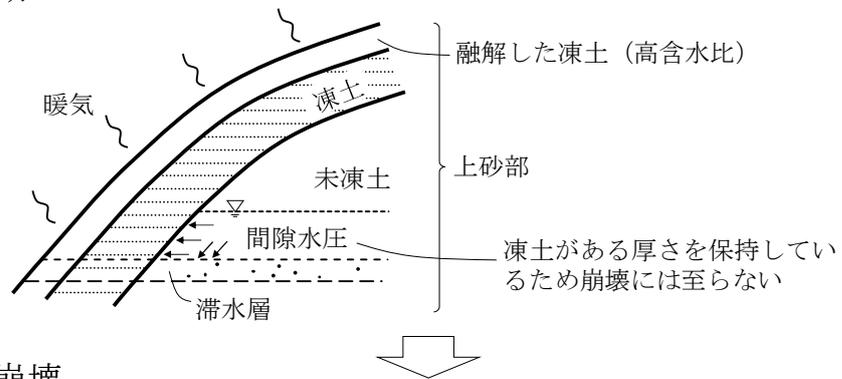
図 1-1(c)は 2 種類の崩壊機構のうち、表層崩壊について示したものである。のり面の土が凍上性を有する場合、のり面表層の凍土内には厚く発達したアイスレンズが形成され、融解時にはその含水比は非常に大きなものになってしまう。これにより、のり面表層が液性限界を超えて泥濘化してしまい、土砂がのり面の勾配によって流動したり、地盤内に形成されたアイスレンズの面に沿って変状や崩壊が発生したりすることとなる。

図 1-1(d)は比較的深い崩壊について示したものである。先述したように、のり面背面に地下水の供給がある場合、のり面表層の凍土が地下水位を上昇させ、間隙水圧を増加させてしまう。冬期間は凍土層が間隙水圧に抵抗するが、融解期になると凍土が薄くなり、間隙水圧を支えきれなくなる。このとき、凍土が崩壊して一気に土砂が地下水とともに突出し、比較的深い位置からの崩壊が発生することとなる。

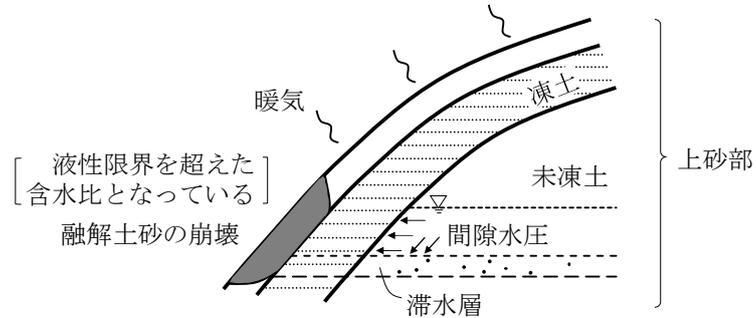
(a) 凍結進行期



(b) 融解期



(c) 表層崩壊



(d) 比較的深い崩壊の場合

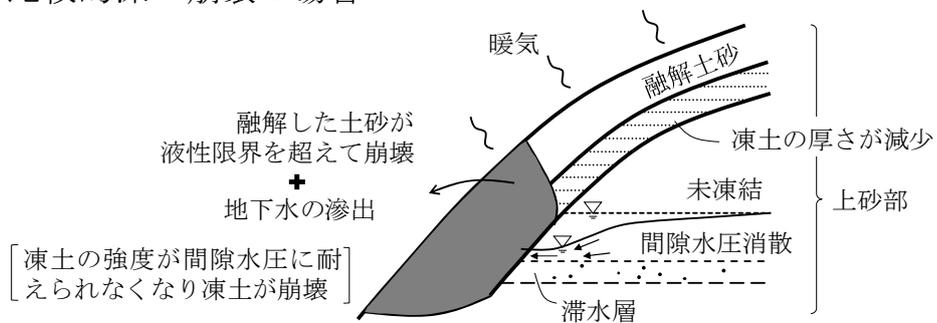


図 1-1 寒冷地におけるのり面の崩壊機構⁶⁾

1.1.3 のり面保護工

のり面を崩壊や侵食、風化から保護し、安定を確保するには、のり面保護工が有効である。

表 1-2 は、「道路土工 切土工・斜面安定工指針（平成 21 年度版）」¹⁾にまとめられた、のり面保護工の主な工種とその目的である。のり面保護工は原則として安定勾配で施工したのり面に実施するものであり、工種を大別すると、構造物によるのり面保護工（以下、構造物工）と、植物によるのり面保護工（以下、のり面緑化工）とがある。

構造物工には、のり面の風化や侵食、表層崩壊の防止を目的としたものと、深層部に至る崩壊の防止を目的としたものがある。構造物工のうち、地山補強土工やグラウンドアンカー工はある程度の土圧やすべり土塊の滑動力に対抗して崩壊を防止するものであり、コンクリート・モルタル吹付工やコンクリート張工などの密閉型の構造物工は、風化の進行を抑制するため、表流水をのり面に浸透させないために設置するものである。

一方、のり面緑化工には植物をのり面に導入する植生工と、植物の生育を補助する金網やのり枠等の緑化基礎工がある。植生工は播種工と植栽工に分けられ、播種工としては種子撒布工、客土吹付工、植生基材吹付工が用いられ、植栽工としては張芝工が採用されている。のり面の植生工については、のり面勾配、土壌硬度、風化の程度もしくは土質などの条件によって選定されている。保護工の目的は、表層崩壊などの小規模なのり面変状を防止することが主であり、植生工で十分対処できる場合も多い。

植生工はのり面に植物を繁茂させ、植物根系（以下、根系）を侵入させることで表層地盤を補強する工法である。雨滴の衝突による浸食にも抵抗でき、植物の蒸散および根系による水分の吸収で、含水量の低減も期待できるため、のり面の安定に有利である。植生工に主に期待される補強効果としては、(1)表層崩壊の抑制効果、(2)雨水による侵食防止効果、(3)切土のり面の風化抑制効果が挙げられている。

表 1-2 のり面保護工の主な工種と目的¹⁾

分類	工種	目的	
のり面緑化工(植生工)	播種工 種子散布工 客土吹付工 植生基材吹付工(厚層基材吹付工) 植生シート工 植生マット工	侵食防止, 凍上崩落抑制, 植生による早期全面被覆	
	植生筋工	盛土で植生を筋状に成立させることによる侵食防止, 植物の侵入・定着の促進	
	植生土のう工 植生基材注入工	植生基盤の設置による植物の早期生育, 厚い生育基盤の長期間安定を確保	
	植栽工	張芝工	芝の全面張り付けによる侵食防止, 凍上崩落抑制, 早期全面被覆
		筋芝工	盛土で芝の筋状張り付けによる侵食防止, 植物の侵入・定着の促進
		植栽工	樹木や草花による良好な景観の形成
		苗木設置吹付工	早期全面被覆と樹木等の生育による良好な景観の形成
構造物工	金網張工 繊維ネット張工	生育基盤の保持や流下水によるのり面表層部のはく落の防止	
	柵工 じゃかご工	のり面表層部の侵食や湧水による土砂流出の抑制	
	プレキャスト枠工	中詰の保持と侵食防止	
	モルタル・コンクリート吹付工 石張工 ブロック張工	風化, 浸食, 表流水の浸透防止	
	コンクリート張工 吹付枠工 連続長繊維補強土工 (のり面保護タイプ) 現場打ちコンクリート枠工	のり面表層部の崩落防止, 多少の土圧を受ける恐れのある箇所の土留め, 岩盤はく落防止	
	石積, ブロック積擁壁工 かご工 井桁組擁壁工 コンクリート擁壁工 連続長繊維補強土工 (擁壁タイプ)	ある程度の土圧に対抗して崩壊を防止	
	地山補強土工 グラウンドアンカー工 杭工	すべり土塊の滑動力に対抗して崩壊を防止	

近年では、(1)表層崩壊の抑制効果には寒冷地で頻発する凍上現象による崩落の抑制も期待できると考えられており、平成21年に改定された「道路土工指針」では「凍上崩落抑制」と追記された。また、のり面の凍上・凍結融解対策として、植生工には植生自体の断熱効果と植生上の堆雪による断熱効果が期待できるとも考えられている。

植生工には種子を用いて植生を導入する播種工と、予め生育させた切芝や苗木等を用いて植生を導入する栽植工の2種類がある。播種工としては種子散布工、客土吹付工、植生基材吹付工がよく用いられるが、積雪寒冷地において播種工を行う場合には種子には耐寒性に優れた種類を採用する必要がある、一般にケンタッキーブルーグラス (KBG)、クリーピングレッドフェスク (CRF)、オーチャードグラス (OG) などが用いられている⁶⁾。また、植栽工としては張芝工がよく用いられる。なお、のり面において植生工を実施する場合、のり面勾配、土壌硬度、風化の程度や土質などの条件に配慮して、工法を選定する必要がある。

1.1.4 寒冷地における植生工の被災

上述したように、植生工にはのり面の(1)表層崩壊の抑制効果、(2)雨水による侵食防止効果、(3)切土のり面の風化抑制効果、さらには凍上崩落抑制といった効果が期待できる。さらに経済的で、自然環境への影響も小さく、周辺景観との調和にも優れていることから、北海道開発局では植生工を優先的に採用することが推奨されてきた。しかしながら、過去に北海道開発局が実施した植生工の損傷に関する調査結果では、植生工の損傷のうち、凍結融解や凍上、融雪水などといった積雪寒冷地特有の要因で発生したと思われるものが、全体の約7割に及ぶことも報告されている⁷⁾

図1-2は筆者らが調査した北海道東部で発生した斜面崩壊事例の一部である。いずれの事例においても崩壊深（本研究ではのり面から崩壊面までの鉛直距離とする）は0.6m以浅であり、一般的な表層崩壊¹⁾の崩壊深1~2mと比べて浅いことがわかる。例えば、図1-2(a)の事例では崩壊深は約0.6mであり、のり面表層における植物根系（以下、根系）の侵入深は約0.4mであった。また、図1-2(b), (c)の事例では、崩壊深、根系の侵入深は概ね一致しており、それぞれ0.35mと0.4mであった。その他にも複数個所で調査を実施したが、崩壊面以深に根

系の侵入は確認できず、すべり面はのり面に侵入した根系の先端もしくはそれよりも幾分深い箇所となっていた。以上の調査から、根系の侵入深以浅で斜面崩壊が発生する可能性は低く、斜面表層地盤は根系によって増強されていると推察される。ただし、積雪寒冷地では斜面表層が寒気に曝されるため、崩壊には凍上現象や凍結融解履歴が強く影響を与えているものと考えられるが、根系が凍上で発生したアイスレンズによって切断されるのか、凍結融解で根系を含む土の強度特性が変化するかといった基礎的な疑問が数多く存在しており、これらについて明らかにした研究事例は筆者が調べた限り存在しない。

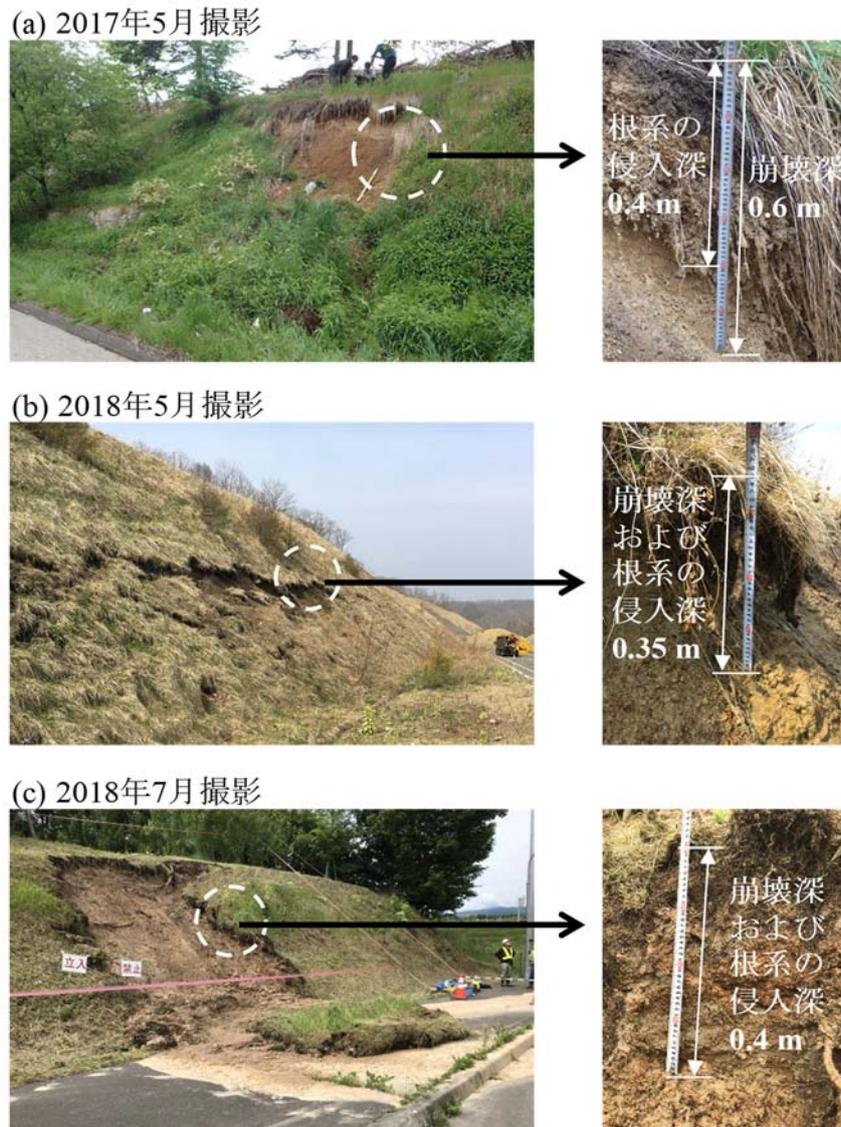


図 1-2 北海道東部で発生した斜面崩壊事例

1.2 既往の研究

1.2.1 積雪寒冷地におけるのり面の動態観測

ここではまず、北海道で実施されたのり面の動態観測事例について、上野ら⁸⁾と Srikrishnan Siva Subramanian ら⁴⁾の研究成果について紹介する。

上野ら⁸⁾は北見工業大学敷地内の盛土のり面に植生工を施し、5シーズンに渡って凍結・融解過程におけるのり面の動態観測を実測し、凍上変位や融解沈下ならびに、それらの成分として現れる移動量を定量的にとらえられた。その結果、のり面の崩壊を誘発すると考えられる法面下方への移動は融解沈下時に発生し、その大きさが凍上量や植生の成育状況などによって異なることを明らかになった。上野らが明らかにした知見について、以下にまとめる。

- 最大凍結深さはのり尻よりものり肩で大きくなり、凍結面はのり面とは平行にならないことを明らかにした。また、最大凍結深さは植生の成育状況によって異なり、種子散布工に比べて張芝工のほうが小さくなることがわかった。
- 凍上は12月上旬から始まって3月上旬にピークを迎え、4月下旬に一部が残留して融解が完了することが明らかとなった。凍上量は含水比の値に強く影響され、のり面上部で小さく、下部で大きくなることがわかった。また、春期に残留する凍上量は5シーズンに渡って、毎年累積された。この結果は、凍結・融解により、のり面の緩みが進行していることを示唆していると考えられる。
- のり面下方向への移動量は年々累積され、5シーズンで最大15cm程度の累積値が記録された。

Srikrishnan Siva Subramanian ら⁴⁾は北海道において土壌水分計、温度計、間隙水圧計を埋設した大規模な試験盛土を構築し、これらの長期的な動態観測を実施した。その結果、のり面表層部分の体積含水率が概ね飽和状態に達した際に、のり面の崩壊が発生し、この時の安全率が1を下回っていたことを確認している。また、Srikrishnan Siva Subramanian らは凍結融解作用や融雪水の浸透などの季節的な気候変化を考慮した斜面安定性評価手法(数値シミュレーション)を提案しており、この手法でのり面内の土壌水分分布を適切に予測できることも確認している。この評価手法により、凍結融解作用や融雪水といった要因が土壌水

分分布に大きな影響を及ぼし、積雪寒冷地におけるのり面の安定性に大きく影響していることも明らかにした。

1.2.2 植物根系を含む土の強度特性に関する既往研究

本研究ではのり面緑化工のうち、特に草本植物による植生工を研究対象とした。積雪寒冷地である北海道において植生工を施工する場合、その年の冬期までに、植生の繁茂が期待できる適切な時期に施工を実施しなければいけない。このため、北海道開発局では長年に渡って、植生工の施工適期（施工限界）について調査・検討を実施してきた。例えば、佐々木ら⁷⁾は北海道内に44カ所の試験工区を設け、ケンタッキー31フェスク、ケンタッキーブルグラスおよびホワイトクローバーを混播してのり面緑化工を実施した。その結果、草丈が20 cmに達していれば、越冬後にのり面保護工とし障害が発生しないことを明らかにしている。また、草丈が20 cmに生長するのに必要な日数および生長が阻害されてしまう気温についても調査を行い、それぞれおよそ69日、10℃であったことを報告している。以上のように、草本植物の草丈に着目して施工適期が検討された事例はあるものの、根系を含む土の力学的性質を考慮して検討された事例は存在しない。

ただし、樹木根系の地盤の補強効果については比較的古くから実施されており、草本植物に比べて報告事例が多く、その補強効果について整理されつつある。例えば、阿部⁹⁾はせん断試験で、塚本ら¹⁰⁾は引抜き抵抗試験で、樹木根系が持つ斜面崩壊防止効果について明らかにしている。

一方で、草本植物の補強効果については、植物の種類や成長の度合いといった要素で、定量的に評価した調査データや研究成果は極端に少なく、根系による補強効果がのり面の安定性にどの程度寄与しているのか明らかになっていない。これは、これまで緑化植物に関する研究の大部分は農業分野で研究が進められてきたことが背景にあり、工学分野で取り上げられることが少なかったことが一因であると考えられる。ここでは数少ない研究事例から、小橋¹¹⁾と宗岡ら¹²⁾、¹³⁾の研究成果について紹介する。

小橋¹¹⁾は草本植物にケンタッキー31 フェスクを用いて一面せん断試験を行い、根系を含む土の強度特性を把握することに取り組んだ。小橋が明らかにした知見について、以下にまとめる。

- 供試体が自然含水比で不飽和状態であれば、根の量が増加するに従って、せん断強度も増加することを明らかにした。このとき、強度定数における内部摩擦角 ϕ は増加傾向にあるものの、粘着力 c には変化が見られなかった。
- 供試体に散水し、十分に湿潤な状態にすると、根の補強効果は全く見られなくなってしまうことがわかった。これは、ケンタッキー31 フェスクの根が土中に十分な水分がある場合に、根と土のからみが悪くなるせいか、容易に引き抜けてしまうためだと考えられる。

宗岡らは草本植物の根系を含む土のせん断強度特性について、長年に渡って研究を行っており^{12), 13)}、最新の研究では客土種子吹付工を想定した土供試体を作製して10種類の草本植物を播種し、根系を含む土供試体のせん断強度特性を把握することに取り組んでいる¹³⁾。その結果、土供試体中に根系が発達すると、粘着力 c が増大し、十分な生育期間が確保できる条件下では内部摩擦角 ϕ も増加しうることを明らかにした。ただし、実験結果からは強度定数(c , ϕ)の増加に、土供試体内の根系指標(種子根、節根長および側根長)が強く関係していることを明らかにしたものの、その因果関係については明らかにできていない。なお、宗岡らは、草本植物の根系を含む土の強度特性に与える凍結融解の影響を把握することが、寒冷地において植生工を実施する際の今後の重要な課題であることを指摘している。

1.3 本研究の目的と方法

以上を背景として、本研究では凍結融解作用が植生工に及ぼす影響を明らかにすることを最終目標とした。上述したように、植生工は植物を繁茂させることでのり面の表層侵食を防ぐとともに、根系の侵入で表層地盤を拘束する工法である。このため、草本植物の根系が土のせん断強度に与える影響を把握することは重要であり、これまでもいくつかの研究例も存在する。しかしながら、根系を含む均質な土供試体を作製することや、実際ののり面表層で作用するような小さな土被り圧を用いて室内試験を実施することなど、試験方法上の解決しなければいけない課題も多い。また、供試体間で異なる根系の発達状況を加味して、試験結果を評価することが難しいことなどもあって、それほど多くの研究例は存在しない。さらに、積雪寒冷地においては、凍結融解履歴が根系に与える影響や、それに伴うせん断強度の変化を把握することが重要であるが、これについて詳細に検討した事例は極めて少ない。

そこで本研究では、一面せん断試験と X 線 CT スキャンを用いて、凍結融解履歴を受けた根系を含む細粒土のせん断特性を把握することに取り組んだ。供試体には、土供試体に播種して草本植物を生育させ、根系を発達させた供試体（以下、根系含有土供試体）を用いている。根系の発達状況の把握には X 線 CT スキャンを活用しており、土中の根系を乱さずに観察・定量化することができるため、この研究分野において非常に画期的である。また、供試体に凍結融解履歴を与える方法としては地盤工学会基準に準拠した凍上試験方法を用いており、凍上現象が根系や土そのものに与える影響を把握する手段としても、X 線 CT スキャンを活用している。

以上の研究方法により、植生工の補強効果を定量的に評価する手法を確立し、根系による補強効果が斜面の安定性にどのように寄与しているのか明らかにすることを試みている。

1.4 本論文の構成

本論文は以下の6章からなる。各章の内容について簡単に記述する。

第1章 序論

本章では、研究背景、既往の研究、研究目的、そしてこれらを明らかにするための研究手法について述べている。研究背景では、のり面・斜面崩壊、特に寒冷地における表層崩壊の発生機構について述べている。また、この対策工であるのり面保護工、特に植生工について詳述している。さらに、積雪寒冷地におけるのり面の動態観測事例と、植物根系を含む土の強度特性に関する研究に分けて、既往の研究をまとめている。

第2章 寒冷地で発生した極表層をすべり面とする斜面崩壊の調査

この章では、本研究で対象としている積雪寒冷地における表層崩壊が発生したのり面で実施した、現地調査の結果について述べている。ここでは、斜面崩壊が発生した道路のり面において、植物根系の侵入深と崩壊深との関係に着目しつつ、現地調査を行っている。また、現地から採取した不攪乱試料を用いた各種の室内試験結果についても詳述している。得られた試験結果を用いて斜面安定解析を行い、のり面崩壊が発生した要因についても検討を行った。

第3章 X線CTスキャンを活用した凍上過程における土の内部観察

この章ではまず、X線CTスキャンの地盤工学分野への活用事例について述べ、凍上現象を観察する手段としてのX線CTスキャンの適用性について論じている。また、寒冷地において斜面崩壊の要因となる凍上現象の発生機構やこれに関する既往の研究について詳述している。

以上を踏まえ、この章では、凍上現象が土に与える影響を把握する手段として、X線CTスキャンを活用することを試みている。ここでは、X線CTスキャンを用いて、凍上した土の内部の様子を非破壊で、微視的に観察することに取り組んでいる。また、X線CTスキャン装置内で土を一次元凍結させることのできる、小型の凍上実験装置の開発も行った。以上の研究手法により、アイスレンズ生成

に伴う土の密度変化といった凍上現象が土に与える影響を把握することを試みている。

第4章 凍結融解履歴を受けた植物根系を含む土のせん断特性に関する基礎的研究

この章では、凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性を把握しうる試験方法を確立するため、その足掛かりとして生育の速さや観察の容易さ等を考慮し、コマツナの根系を含む土供試体の一面せん断試験やX線CTスキャンによる観察を行った。

本研究では、植物根系による土の補強効果を一面せん断試験で、土中の植物根系の発達状況をX線CTスキャンで把握することを試みている。また、供試体に凍結融解履歴を与える方法としては地盤工学会基準に準拠した凍上試験方法を用いている。ここでは一面せん断試験や凍上試験の方法について詳述するとともに、根系の観察に対するX線CTスキャンの適用について検討を行っている。

第5章 ケンタッキーブルーグラスの根系が細粒土のせん断強度に与える影響

この章では、寒冷地での採用実績も多いケンタッキーブルーグラスを用いて、生育期間や凍結融解履歴が異なる多くの供試体を作製して、低応力下での定圧一面せん断試験を実施した。また、一面せん断後の供試体を用いてX線CTスキャンを行うことで、根系の発達状況を観察し、これを用いたせん断試験結果の評価も試みた。ここでは定圧一面せん断試験の方法について詳述するとともに、根系の発達状況を把握するためのX線CTスキャンの条件や、得られたX線CTスキャン画像から根系を抽出するための解析手法について詳述している。

第6章 結論

この章では、本研究で得られた全ての知見についてまとめた。

第1章の参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針（平成21年度版），丸善出版，pp.14, 2009.
- 2) 河上 房義，森 芳信，柳沢 栄司：土質力学（第8版），森北出版株式会社，pp.135, 2012.
- 3) 執印 康裕：植生が表層崩壊発生に与える影響について，特集「治山・砂防における緑化の評価」，Vol.55, No.1, pp.71-78, 2002.
- 4) Srikrishnan Siva Subramanian, Tatsuya Ishikawa, Tetsuya Tokoro：Stability assessment approach for soil slopes in season cold regions, Engineering Geology, Vol.221, pp.154-169, 2017.
- 5) 佐々木 晴美：寒冷地の法面保護，土木技術資料，Vol.22, No.8, pp.18-30, 1980.
- 6) 地盤の凍上対策に関する研究委員会：寒冷地地盤工学－凍上被害とその対策－，地盤工学会北海道支部，2009.
- 7) 佐々木 晴美：北海道における道路のり面植生について，積雪寒冷地の道路に関する調査研究論文集，pp.231-236, 1980.
- 8) 上野 邦行，芮 大虎，中村 大，伊藤 陽司，山下 聡，鈴木 輝之：植生保護法面の凍結・融解過程における挙動特性，地盤工学ジャーナル，Vol.5, No.3, pp.413-424, 2010.
- 9) 阿部 和時：原位置一面せん断試験によるスギ根系の斜面崩壊防止機能の研究，日本緑化工学会誌，第22巻，第2号，pp.95-108, 1996.
- 10) 塚本 良則，峰松 浩彦，藤浪 武史：樹木根系の斜面安定効果-主として水平根の量と働きについて-，緑化工技術，第22巻，第1号，1986.
- 11) 小橋 澄治：斜面安定に及ぼす根系の影響についての最近の知見，緑化工技術，第10巻，第1号，1983.
- 12) 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，第43巻，第1号，2017.
- 13) 宗岡 寿美，下田 誠也，山崎 由理，木村 賢人，辻 修：10種類の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，第44巻，第1号，2018.

第2章

寒冷地で発生した極表層を すべり面とする斜面崩壊の調査

2.1 調査概要

筆者は本研究の実施期間中に、北海道東部の複数個所で発生したのり面・斜面の表層崩壊について、植物根系の侵入深と崩壊深との関係に着目しつつ、現地調査を実施してきた。その中でも、2018年7月上旬の降雨後に発生した道路のり面の斜面崩壊（第1章 図1-2(c)）において、サンプリングを含む詳細な調査を行う機会を得た。ここでは、実施した崩壊面の測量や簡易動的コーン貫入試験、崩壊地直近の未崩壊地から採取した不攪乱試料を用いた定圧一面せん断試験の結果について詳述する。また、一面せん断試験から得られた強度定数を用いて無限長斜面の安定解析を行い、崩壊に至った要因についても検討を行った。

2.1.1 表層崩壊発生時の気象状況

2018年7月上旬、北海道では2日から5日にかけて停滞した梅雨前線や台風7号から変わった温帯低気圧の影響を受けて大雨となり、各地で土砂災害が発生した。

図2-1はアメダス北見の気象データをもとに、7月1日から13日までの時間降水量と累積降水量の推移をまとめたものである。図に示すように、7月3日2

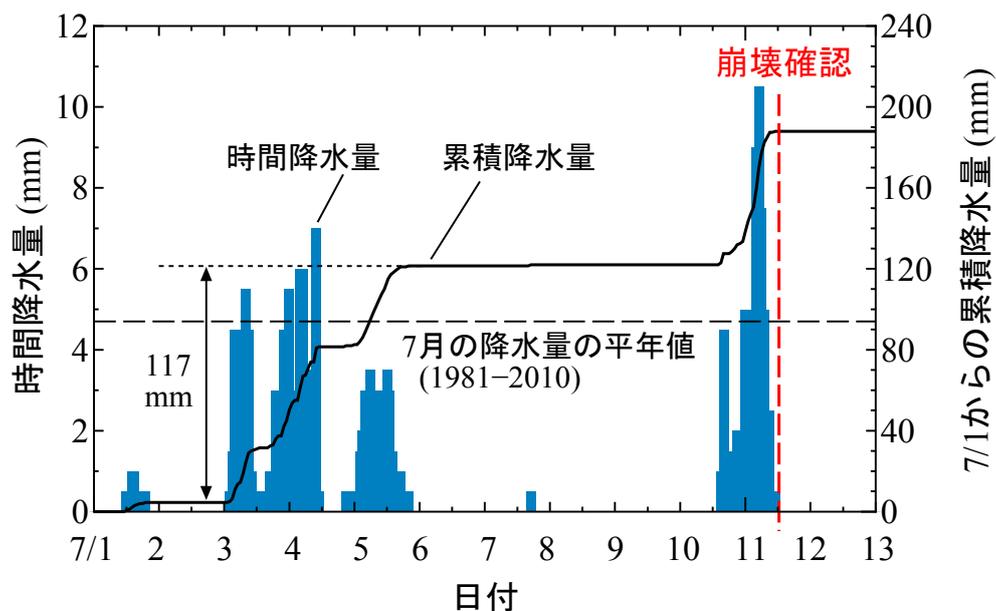


図2-1 2018年7月1日から13日までの時間降水量と累積降水量の推移

時から雨が降り始め、5日20時までの66時間で累積降水量は117mmに達している。この3日間の降水量は7月の月降水量の平年値94mmを大きく上回るものであり、この時の雨量はこの地域にとって、かなり大きいものであった。その後、10日15時辺りから再び雨が降り始め、11日早朝に時間降水量10mmを超えるやや強い雨が降ったことがわかる。本研究で対象とした道路のり面の崩壊(図1-2(c))は、上述の降雨履歴を受けて、11日に確認された。筆者らは斜面崩壊が発生した直後の13日から数日間にわたって、現地調査を実施した。

2.1.2 調査対象箇所の概要

図2-2に斜面崩壊が発生した道路のり面の全景を示す。調査地点はゆるやかに傾斜した段丘の末端付近に位置する両切りの道路のり面である。対象の切土のり面は北向きであり、高さは約4m、勾配は45°、斜面上部は平坦地で耕作地として利用されている。表面には侵食防止で植生工が施されており、ラス網が敷設されていた。崩壊が確認された直後の7月13日に現地調査を実施したところ、図のように幅4m、長さ4mにわたってのり面の表層部分が滑動し、崩土が歩道に乗り上げて止まっている様子が観察された。



図2-2 斜面崩壊が発生した道路のり面の全景

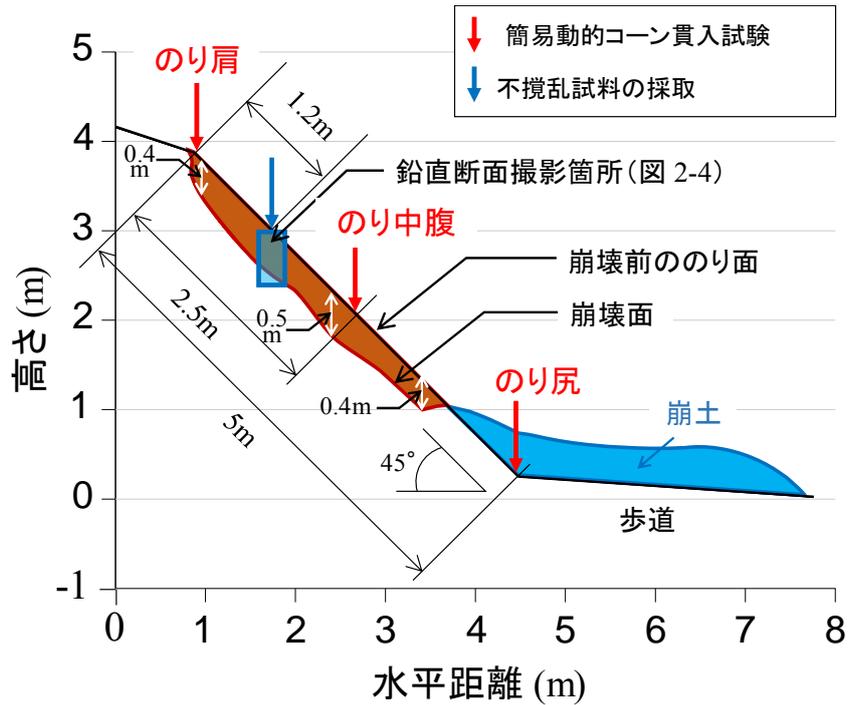


図 2-3 斜面崩壊箇所の断面図

図 2-3 は測量によって求めた斜面崩壊箇所の断面図である。図のように，崩壊前ののり面から崩壊面までの深さ（鉛直距離）は概ね 0.4～0.5 m であった。図中には，現地調査において実施した簡易動的コーン貫入試験と不攪乱試料の採取位置も示している。

2.1.3 崩壊箇所の土質構成

図 2-4 は崩壊地直近の未崩壊地（のり肩から 1.2 m 下方，不攪乱試料の採取位置と同一箇所）を開削して撮影した鉛直断面である。目視観察から，深度 0.1～0.3 m には比較的含水比の高い砂質土層が存在しており，深度 0.3～0.4 m には崩壊面と疑われる風化が進んだ細粒土層が確認できた。また，その直下には幾分含水比の低い弱風化の細粒な砂質土層が存在することもわかった。なお，表層崩壊直後に行った鉛直断面の目視観察では，深度 0.2～0.4 m 付近において，水が染み出している様子が観察されている。この断面から深さ方向に 0.1 m 間隔で土試料を採取して，粒度試験と土粒子の密度試験，含水比の測定を実施した。

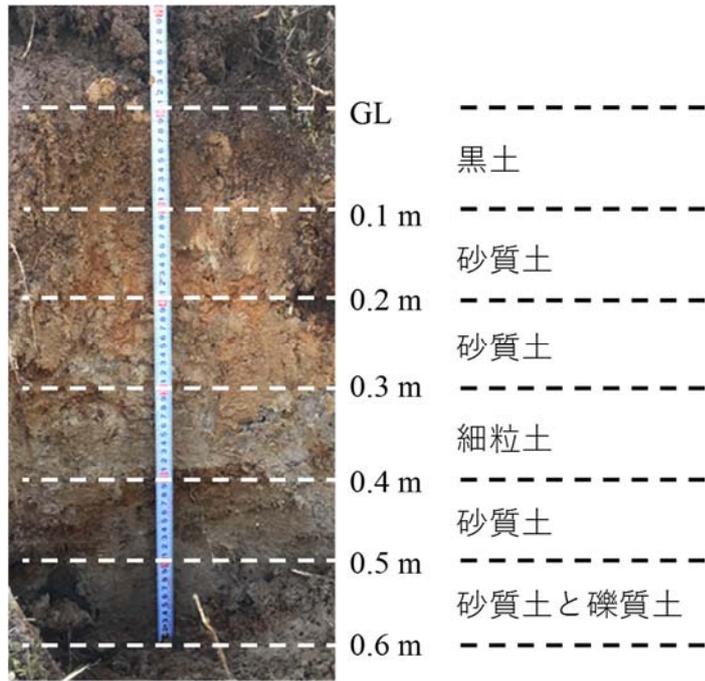


図 2-4 未崩壊地で撮影した鉛直断面

2.1.4 採取した土試料の土質試験結果

図 2-5 は未崩壊地から採取した土試料の粒径加積曲線である。本研究では 0.075mm 以上の粒径にはふるい分析で、それ以下の粒径についてはレーザー解

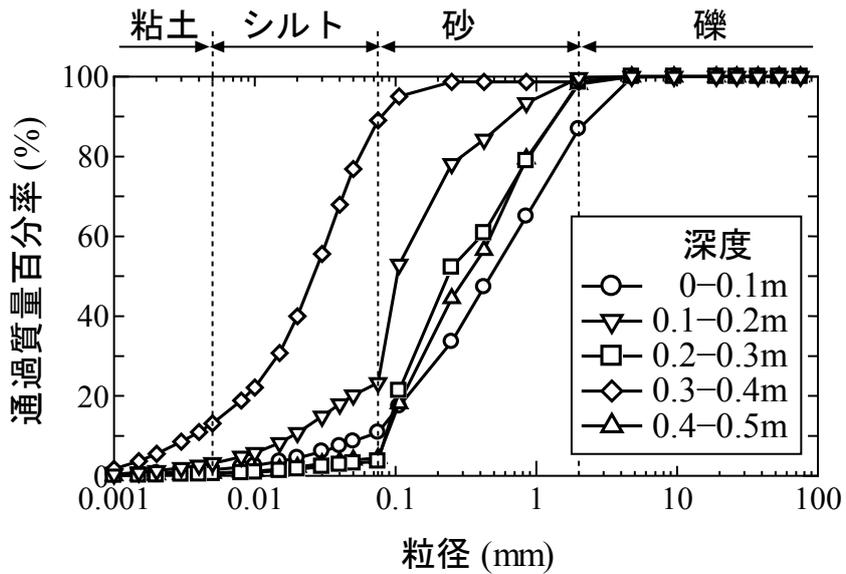


図 2-5 各深度から採取した土試料の粒径加積曲線

析を用いて、粒度分布を求めた。図 2-6 は図 2-5 から求めた各深度における細粒分含有率 F_c に、土粒子の密度試験結果と自然含水比を併せて示したものである。崩壊面と疑われる深度 0.3~0.4 m 付近の土試料では、細粒分含有率 F_c が他の深度に比べて極端に高いことがわかる。このことから、何らかの風化作用によって、細粒化が進んでいると考えられる。

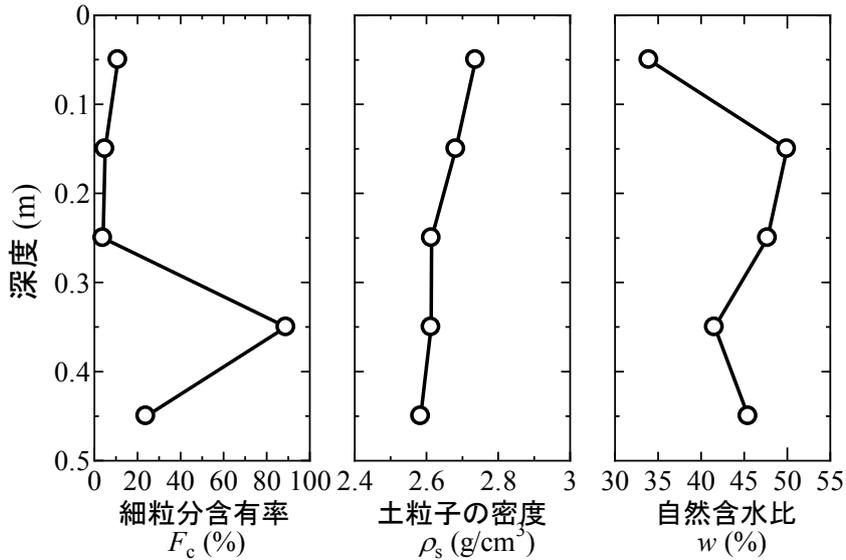


図 2-6 各深度における細粒分含有率および土粒子の密度と自然含水比

2.1.5 簡易動的コーン貫入試験

図 2-7 は未崩壊地で実施した簡易動的コーン貫入試験の結果である。ここでは右縦軸に深度、左縦軸にのり高を併記した。のり肩で深さ 0.4 m、のり中腹で深さ 0.5 m まで、 N_d 値は 1 以下と非常に低い値を示しており、のり面表層が大きく脆弱化していることがわかる。この結果と表層崩壊箇所の横断形状、断面の観察結果や土質試験結果から、崩壊深はのり肩で 0.4 m、のり中腹で 0.5 m と考えた。表層崩壊のすべり面付近の N_d 値は 10 程度であることが多いとの報告²⁾に比べると、調査地点の結果は小さな値となっているが、2009 年台風 9 号による兵庫県北西部における山腹斜面崩壊の調査結果³⁾と概ね同様の値である。

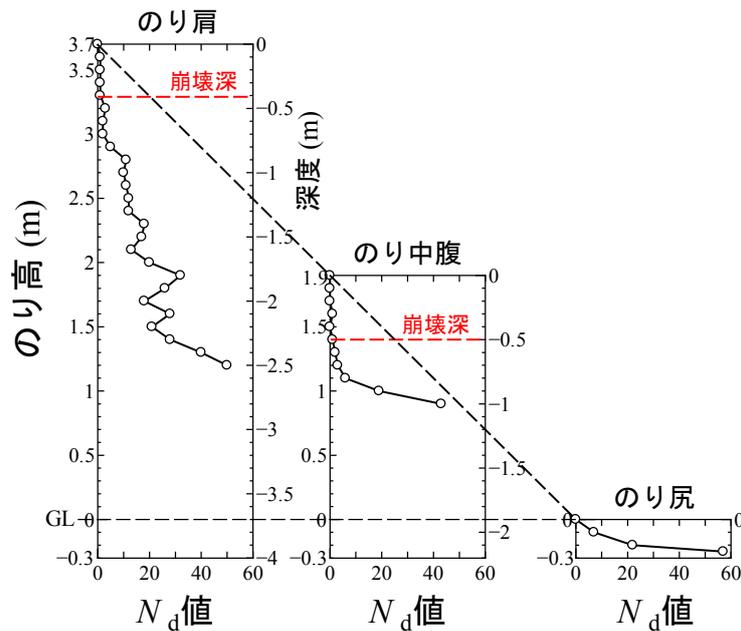


図 2-7 簡易動的コーン貫入試験結果

2.1.6 採取した不攪乱試料

写真 2-1 のように未崩壊地では定圧一面せん断試験用の不攪乱試料の採取も実施した。ここでは内径 60 mm のアクリル円筒の先端に、刃先角度が鋭利なシューを取り付け、乱れが生じないように注意しながら、地山にゆっくりと押し付けて採取した。採取した土試料は、崩壊面と疑われる風化が進んだ高含水比の細粒土層（深さ 0.3~0.4 cm）と崩壊面以深と考えられる弱風化で低含水比の砂質土層（深さ 0.4~0.5 cm）の 2 種類である（図 2-8 参照）。



写真 2-1 不攪乱試料の採取

2.2 定圧一面せん断試験

2.2.1 供試体の作製

図 2-8 に未崩壊地から採取した供試体の位置を示す。本研究では 3 種類の供試体に対して定圧一面せん断試験を実施し、強度定数（粘着力 c ，内部摩擦角 ϕ ）を求めた。一つ目は不飽和状態（自然含水比）にある崩落深と同深度の未崩壊地から採取した細粒土（崩壊深供試体・不飽和），二つ目は強制的に飽和度を高めた崩落深と同深度の細粒土（崩壊深供試体・疑似飽和），三つ目は不飽和状態の崩落深以深の砂質土（崩壊深以深供試体・不飽和）である。

写真 2-2 に整形する前の供試体と整形した後の供試体を示す。始めに，不攪乱試料は下端面をカッターナイフでカットし，全断面ピストンを用いてアクリル円筒から押し抜きながら，同内径のせん断箱内に直接移設する。次に，上端面をカッターナイフでカットし，上下端面を平滑に整形して供試体とした。供試体の寸法は地盤工学会基準⁴⁾の標準とされる直径 60 mm，高さ 20 mm である。

崩落深から採取した試料は透水係数が低く，浸水だけで飽和させることが困難であったため，以下のような手順で強制的に飽和させた。まず供試体をアクリル円筒に入れ，上下を多孔質板で挟み，内部を蒸留水で満たした容器内に浸水さ

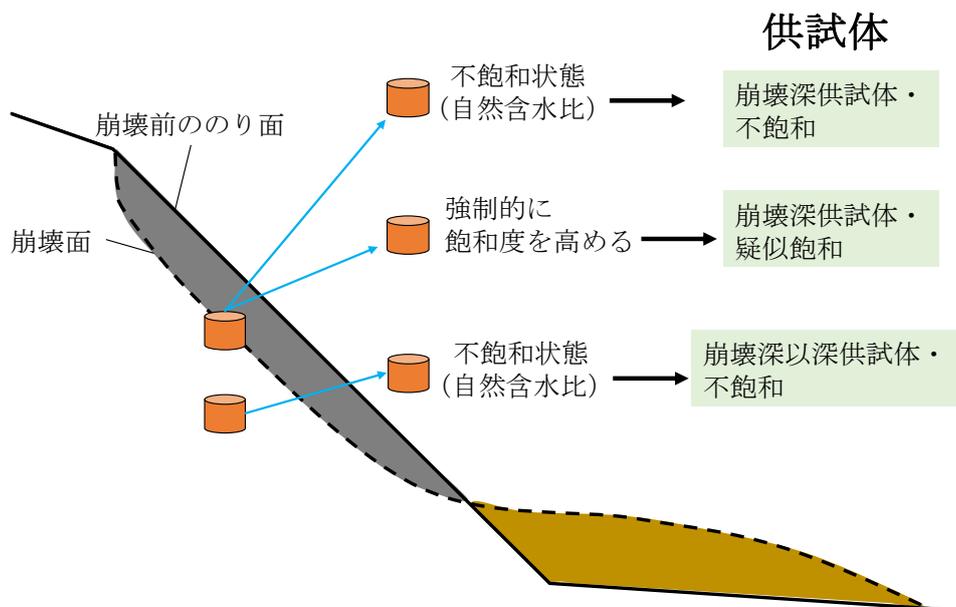


図 2-8 未崩壊地から採取した供試体の位置

せる。次にこの容器ごとを耐圧容器に入れて、真空ポンプで脱気した。この時、供試体高さが変わらないように、供試体上部には重錘を載せている。なお、脱気作業は1週間程度の時間をかけてゆっくり行った。

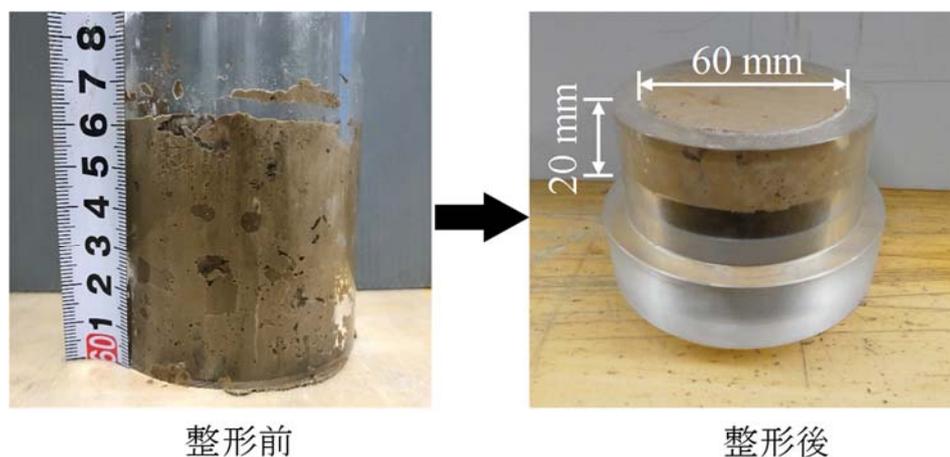


写真 2-2 供試体の作製

2.2.2 試験装置および試験方法

図 2-9 は本研究で用いた一面せん断試験装置である。垂直応力 σ は重錘によって載荷し、反力板側にある鉛直荷重計で計測する構造となっている。また、水平変位 δ はダイレクトドライブモーター、減速機、スプラインボールネジが連結された載荷システムによって与えられ、モータ回転角などから計測される。

今回のような深さ 0.4~0.5 m 程度の表層崩壊では、原位置において実際に崩壊面に作用する鉛直有効応力は極めて小さい。このため、本研究では可能な限り低鉛直応力下で一面せん断試験を行うことを試みた。しかしながら、この場合に地盤工学会基準「土の圧密定圧一面せん断試験方法」⁴⁾で規定されているように、鉛直応力の変動率を圧密応力の $\pm 3\%$ 以下とすることは極めて困難である。そこで、せん断箱内面の周面摩擦力によるせん断面上の鉛直応力の変化を、反力板側に設置した鉛直荷重計の計測値で把握しながら、重錘を増減させることで定圧制御を行った。これにより、鉛直応力の変動率は $\pm 5\%$ 程度にまで抑えることができている。

実験中(圧密過程から一面せん断試験終了まで)の鉛直応力については 5 kN/m^2 , 10 kN/m^2 , 15 kN/m^2 の3種類とした。鉛直応力の値はそれぞれ、のり面の極表層(土被り厚 0.25 m)、崩壊深(土被り厚 0.50 m)、崩壊深以深(土被り厚 0.75 m)を想定して設定している。

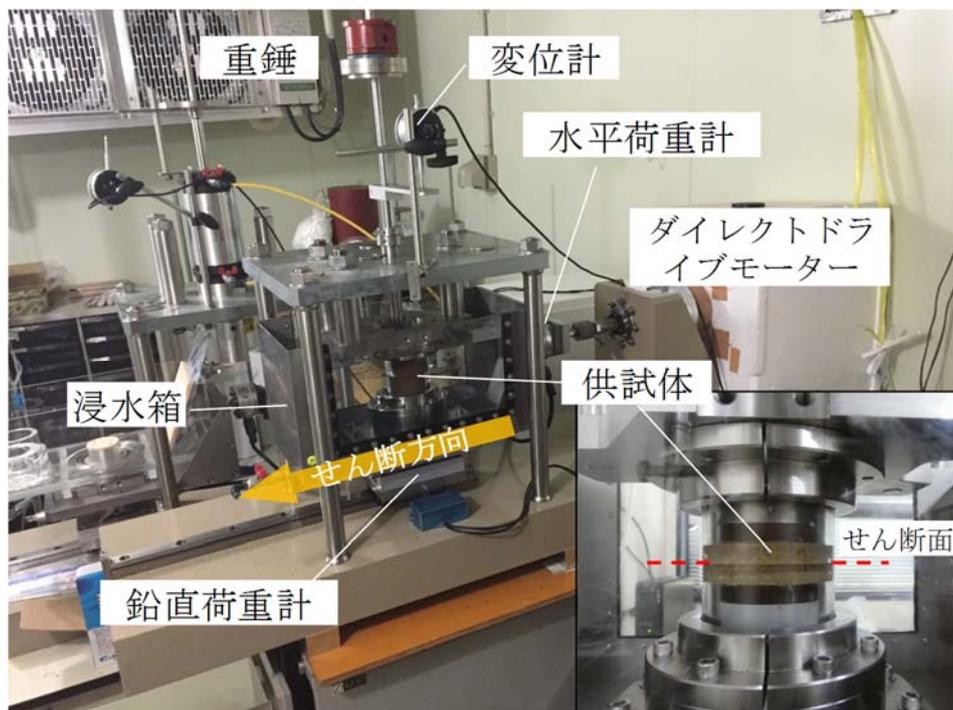
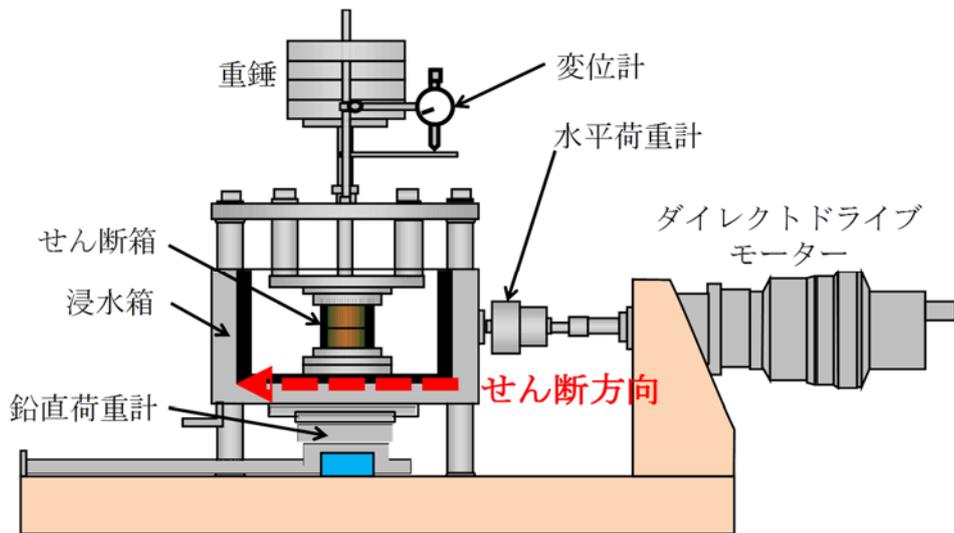


図 2-9 一面せん断試験装置

供試体のせん断は、浸水箱外部に設置されたダイレクトドライブモーターにより一定速度で行った。さらに、せん断中の体積変化は鉛直載荷軸に取り付けられた変位計で測定している。上下せん断箱間隔は 0.2 mm, せん断変位速度は 0.02 mm/min, 最大水平変位は 7 mm とした。せん断は約 24 時間の圧密過程を経てから行い、せん断位置は供試体底面から 10 mm とした。なお、崩壊深供試体・飽和については、浸水箱を水で満たしてから圧密している。

2.2.3 定圧一面せん断試験結果および考察

表 2-1 は本研究で実施した試験結果をまとめたものである。本来であれば、同条件で数多くの試験を行うべきであるが、現場から採取できた試料数に限りがあることを考慮して、表中に示す試験数に留まっている。

表 2-1 一面せん断試験結果のまとめ

供試体名		崩壊深供試体・ 不飽和			崩壊深供試体・ 疑似飽和			崩壊深以深供試 体・不飽和		
		5	10	15	5	10	15	5	10	15
鉛直応力 σ	kN/m ²									
初期含水 比 w_0	%	54.1	54.0	53.6	51.9	57.1	50.5	39.7	42.4	44.4
試験後の 含水比 w	%	50.1	50.7	48.1	54.4	57.1	50.6	40.0	38.8	42.3
湿潤密度 ρ_t	g/cm ³	1.55	1.69	1.62	1.65	1.68	1.65	1.64	1.60	1.58
乾燥密度 ρ_d	g/cm ³	1.04	1.12	1.10	1.07	1.07	1.10	1.17	1.15	1.11
間隙比 e		1.52	1.34	1.38	1.45	1.45	1.38	1.20	1.24	1.33
飽和度 S_r	%	85.9	99.2	90.9	98.4	102.9	95.7	86.0	80.8	81.9
最大せん 断応力 τ_{max}	kN/m ²	6.9	10.1	13.2	4.4	8.6	11.8	10.4	16.5	23.9

図 2-10 は定圧一面せん断時におけるせん断変位 δ に伴う鉛直応力 σ 、鉛直変位 ΔH 、せん断応力 τ の推移を供試体ごとに比較したものである。全ての試験において、せん断試験中の鉛直応力はほぼ一定に制御できている。

崩壊深供試体・不飽和と崩壊深供試体・疑似飽和におけるせん断応力 τ を比較すると、飽和に伴ってサクシオンが低下・消失し、最大せん断応力 τ_{max} が低下していることがわかる。次に、崩壊深供試体・不飽和と崩壊深以深供試体・不飽和でせん断応力 τ_{max} を比較すると、明らかに崩壊深以深供試体の τ_{max} が大きいことも確認できる。変形挙動については、いずれの崩壊深供試体でも明瞭なピークは見られず、延性的な挙動を示していることがわかる。一方、崩壊深以深供試体・不飽和では明瞭なピークを確認することができ、比較的脆性的な挙動を示している。

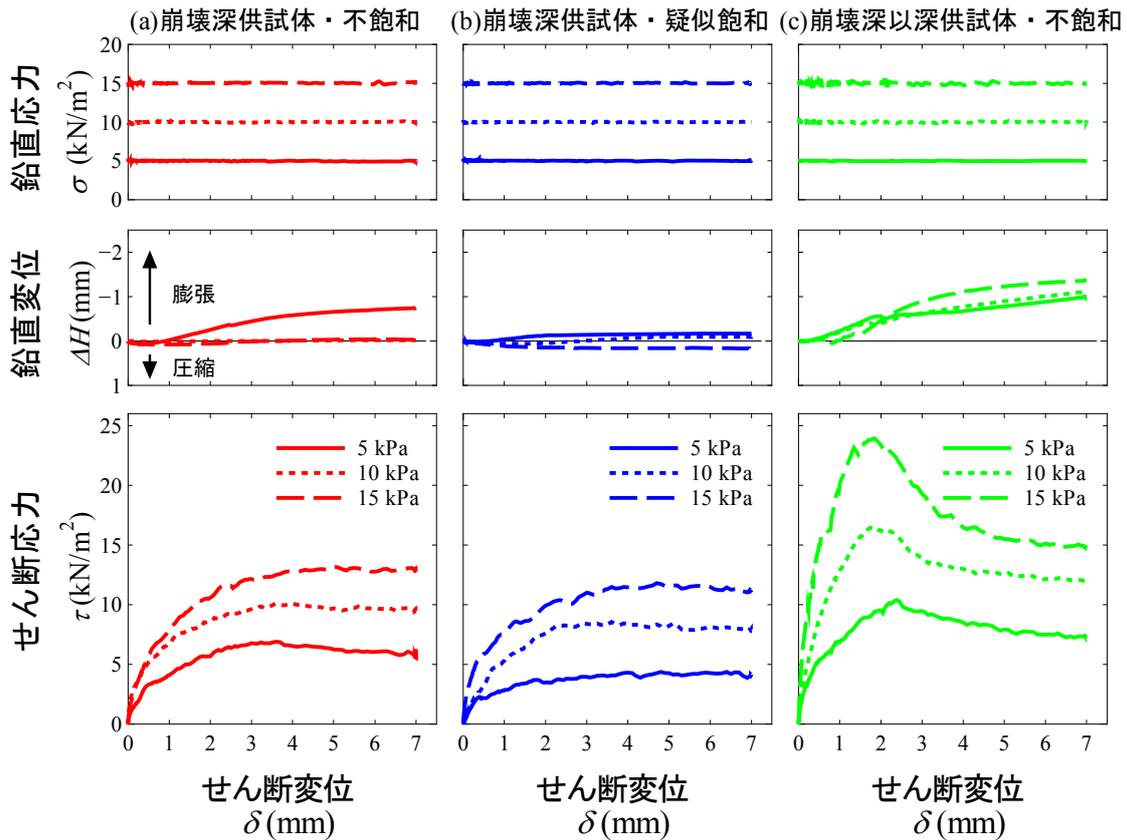


図 2-10 (a)崩壊深供試体・不飽和, (b)崩壊深供試体・疑似飽和および (c)崩壊深以深供試体・不飽和の一面せん断試験結果

ダイレイタンシー特性に着目すると、採取深度が浅い崩壊深供試体・不飽和では、低鉛直応力下（5 kPa）で正のダイレイタンシー傾向（過圧密的挙動）、高鉛直応力下（10 kPa, 15 kPa）では負のダイレイタンシー傾向（正規圧密的挙動）を示していることがわかる。ただし、飽和状態になると低鉛直応力下でも正のダイレイタンシー傾向は確認できなくなった。一方、採取深度が大きい崩壊深以深供試体・不飽和では、いずれの鉛直応力下においても正のダイレイタンシー傾向（過圧密的挙動）を示していることがわかる。

図 2-11 は図 2-10 に示した各試験における最大せん断応力 τ_{max} とそのときの鉛直応力 σ の関係をプロットし、各供試体から得られた粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を比較したものである。崩壊深供試体・不飽和は飽和度を上昇させることによって、 ϕ が幾分増加し、 c が低下していることがわかる。一方、崩壊深以深供試体・不飽和は c が崩壊深供試体・不飽和よりも若干小さいものの、 ϕ はのり面の勾配（45°）よりも明らかに大きいことが確認できる。

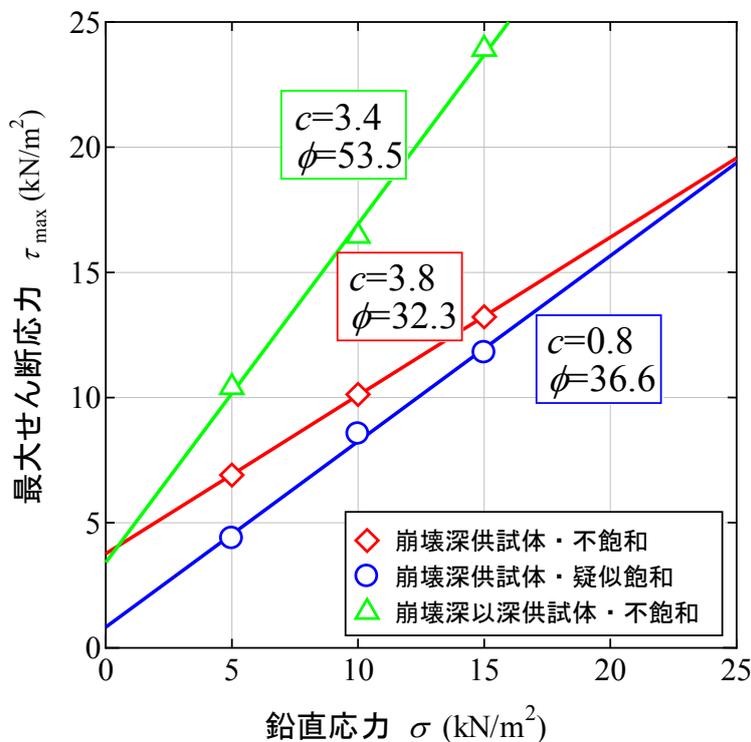


図 2-11 強度定数の比較

2.3 斜面安定解析

ここでは、本研究に用いた斜面安定解析手法について、この分野の教科書である「土質力学」⁵⁾と「図説 わかる土質力学」⁶⁾を参考に、詳述する。土の斜面で崩壊が生じる場合、普通は一定の面（すべり面）に沿って起こる。これは、このすべり面上に作用するせん断力が、この面に沿うせん断抵抗力より大きくなったためであり、土中の不連続な点におけるせん断応力が土のせん断強さより大きくなったからといって、直ちに崩壊が起こるわけではない。このため、斜面の安定を検討するには、

- (a) 土体内部において、最も大きなせん断応力が働くような面の位置と、この面に作用するせん断応力の大きさ
 - (b) 同じ面に沿うせん断抵抗
- を求めることが必要である。

斜面の安定を検討するには、これを簡略化するため、斜面の種類は以下の2つに大別して考える（図2-12）。

- (1) 半無限に広がった斜面。一様な勾配の斜面が無限に続き、斜面の下の土の性質と状態は均斉である場合。

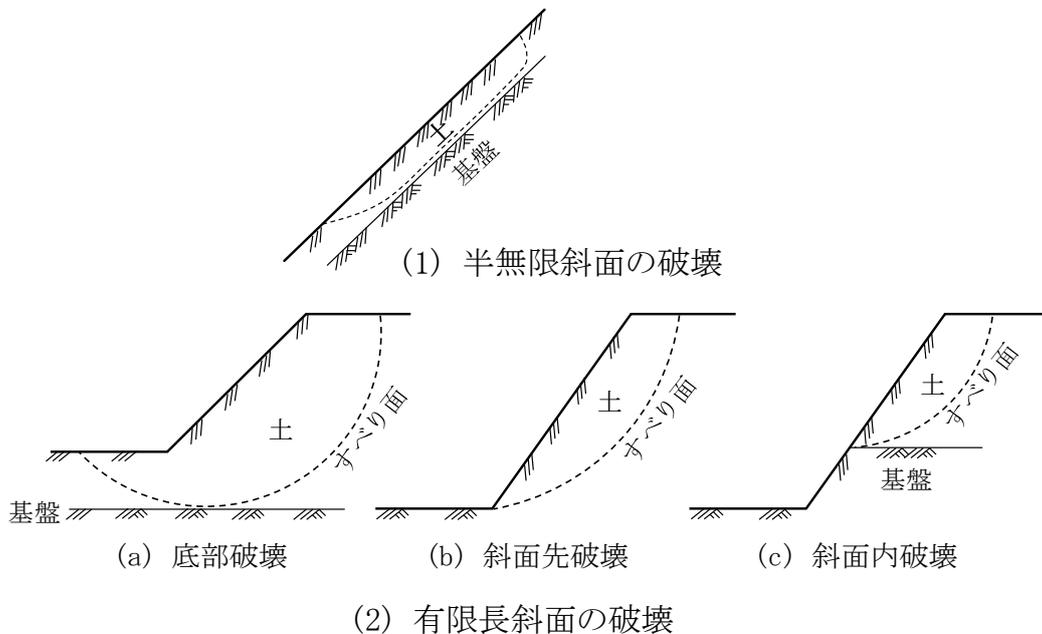


図2-12 斜面の崩壊⁵⁾

(2) 長さが有限の斜面。斜面の肩より上の地表面と斜面先より下の地表面が水平である場合。

(1)の半無限に広がった斜面で起こる崩壊の長さは、すべり面までの深さに比べてはるかに大きい平板状である。これに対して、(2)の有限長の斜面に生じる崩壊の形は、斜面の勾配の方向に軸をもつ半卵形で、その形は斜面の高さや勾配、土質などによって異なる。

本研究では、降雨の浸透による強度定数の変化が、具体的にのり面の極表層の安定性にどのように影響するのか把握するため、一面せん断試験で得られた強

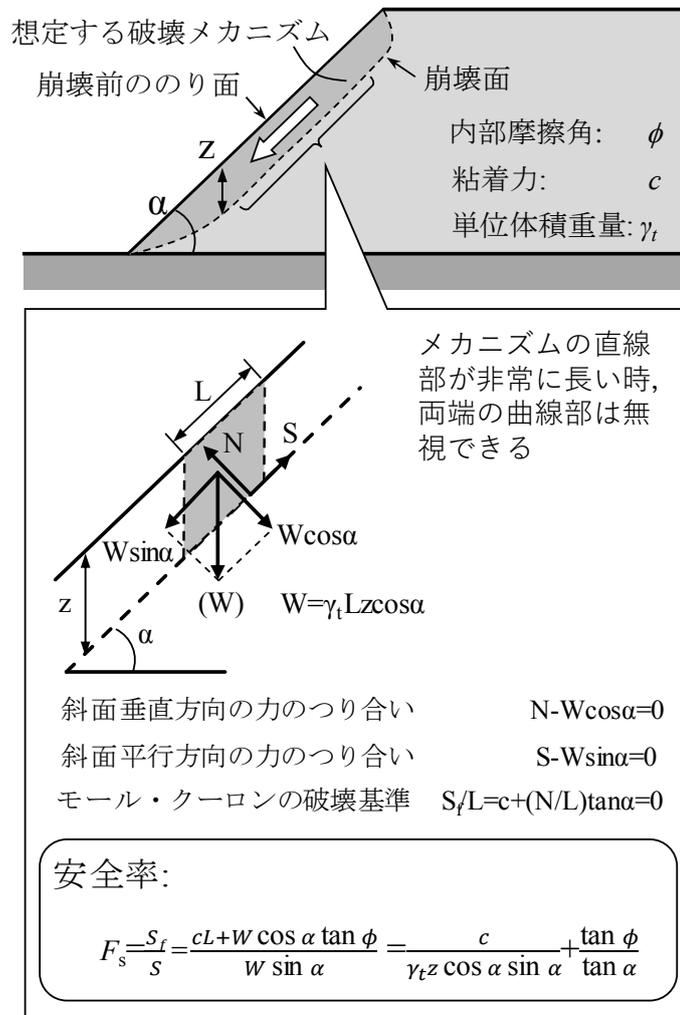


図 2-13 無限斜面の安全率の算定⁶⁾

度定数を用いて、図 2-13 に示す浸透流のない無限長斜面の安定解析を実施した (図 2-12(a) 参照)。

一般的に、斜面の安定解析ではすべり面を仮定し、すべり土塊に働く力のつり合いを考えて、安全率を計算する。その最小の安全率を求め、斜面の安全率とする。ここでは、図 2-13 に示すように、角度 α で傾いた直線状のすべり面に沿って、土塊が滑り落ちるメカニズムを想定した。この土塊が滑り落ちる瞬間の力のつり合いを考える。すべり面垂直方向には、土塊の奥行き 1 m 当たりの重量 W (kN/m)の斜面垂直成分 $W\cos\alpha$ が、すべり面下部からの垂直反力 N (=垂直応力 σ (kN/m²) \times 長さ L (m)) (kN/m)とつり合っている。すべり面平行方向には、土塊重量のうち $W\sin\alpha$ が、すべり面下部からのせん断抵抗力 T (=せん断応力 τ (kN/m²) \times 長さ L (m)) (kN/m)とつり合っている。一方で、モール・クーロンの破壊基準を考えると、せん断応力 τ は $c+\sigma\tan\phi$ まで増加すると極限 (破壊) 状態に至る。よって安定性の程度を示す尺度である安全率 F_s は、(極限状態のせん断抵抗力 S_f) / (現在のせん断力 S) $= (c+\sigma\tan\phi)L / W\sin\alpha$ より、式 (2-1) にて計算される。

$$F_s = \frac{S_f}{S} = \frac{cL + W\cos\alpha\tan\phi}{W\sin\alpha} = \frac{c}{\gamma z\cos\alpha\sin\alpha} + \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \quad (2-1)$$

ここで、 F_s は安全率、 c は粘着力、 α は想定すべり面勾配、 ϕ は内部摩擦角、 z は想定すべり面の深さ、 γ は湿潤単位体積重量である。

表 2-2 無限長斜面の安定解析の入力条件

入力項目				数値
湿潤単位体積重量	γ	(kN/m ³)	不飽和	15.9
			疑似飽和	16.3
粘着力	c	(kN/m ²)	不飽和	3.8
			疑似飽和	0.8
内部摩擦角	ϕ	(°)	不飽和	32.3
			疑似飽和	36.6
想定すべり面勾配	α	(°)		45.0

表 2-2 に崩壊深供試体（不飽和，疑似飽和）を対象とした安定解析の入力条件を，図 2-14 に安定解析結果を示す。まず，不飽和状態における解析結果を見ると，0.4 m 以深から安全率は 2 を下回っており，不飽和状態であっても当該のり面の表層部分は比較的不安定な状態であったことがわかる。この結果は，崩壊地直近の未崩壊地で実施した簡易動的コーン貫入試験結果とも良い整合を示している。次に，疑似飽和状態における解析結果を見ると，0.4 m 以深から安全率は 1 を下回る結果となった。この深さ 0.4 m は，実際におけるのり面の崩壊深と概ね一致している。また，飽和度が上昇したことによって内部摩擦角は上昇（約 4°）したにも関わらず（図 2-11 参照），図 2-14 中に示した深度の範囲内において，疑似飽和状態における安全率は不飽和状態よりも小さい。このことから，飽和度が上昇したことによる安全率の低下には，粘着力の低下（3 kN/m²）が大きく寄与していると解釈できる。つまり，本文で対象とした斜面崩壊の主たる要因は，降雨浸透によって生じた粘着力の低下であると考えられる。

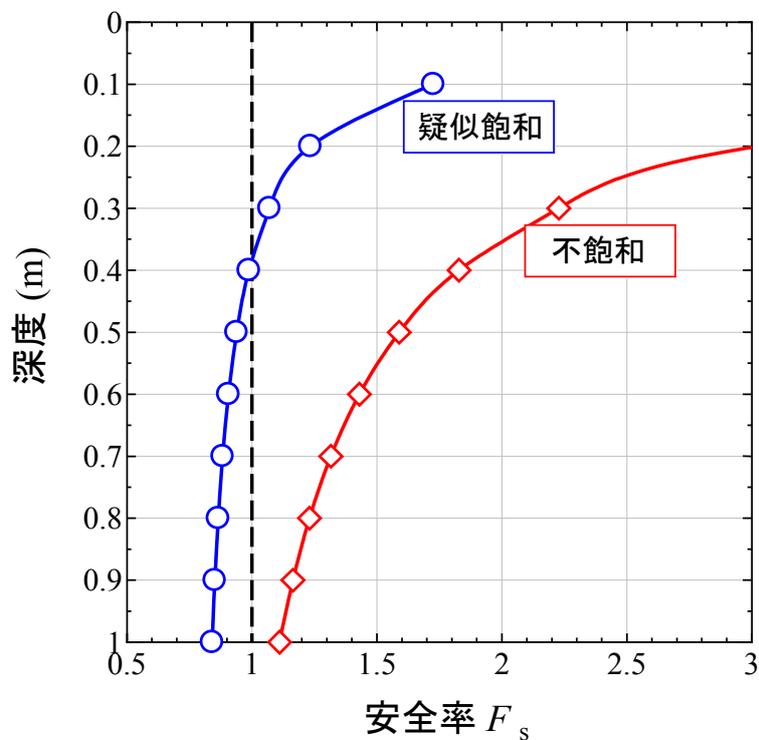


図 2-14 無限長斜面の安全解析

2.4 まとめ

斜面崩壊が発生した道路のり面において現地調査（崩壊面の測量や簡易動的コーン貫入試験など）を実施し、崩壊地直近の未崩壊地から採取した不攪乱試料を用いて定圧一面せん断試験を行った。得られた知見についてについて、以下にまとめる。

- 崩壊面と疑われる深度 0.3~0.4 m 付近の土試料は、細粒分含有率 F_c が他の深度に比べて極端に高いことがわかった。この結果から、崩壊面付近の土層は凍結融解作用や乾湿繰り返し作用を受けて風化し、細粒化が進んでいると考えられる。
- 崩壊深供試体・不飽和は飽和度を上昇させることによって、内部摩擦角 ϕ が幾分増加し、粘着力 c が低下することがわかった。一方で、崩壊深以深供試体・不飽和では c が崩壊深供試体・不飽和より若干小さいものの、 ϕ はのり面の勾配（45°）よりも明らかに大きいことが確認できた。
- 一面せん断試験から得られた強度定数を用いた安定解析から、不飽和状態であっても 0.4 m 以深から安全率は 2 を下回っており、当該のり面の表層部分は比較的不安定な状態であったことがわかった。また、疑似飽和状態では、0.4 m 以深から安全率は 1 を下回る結果となっており、この深さ 0.4 m は実際におけるのり面の崩壊深と概ね一致した。
- 安定解析結果から、飽和度が上昇したことによる安全率の低下には、粘着力の低下が大きく関与していると解釈できた。このことから、ここで示した斜面崩壊の主たる要因は、降雨浸透によって生じた粘着力の低下であると考えられる。

崩壊深および根系の侵入深は概ね一致しており、0.4 m であった。安定解析においても、崩壊面以浅の安全率は飽和・不飽和に関わらず 1 を上回る結果となっており、根系の侵入深以浅で斜面崩壊が発生する可能性が極めて低いことがわかった。以上の 2 つのことから、斜面表層地盤は根系によって増強されていることが推察できる。

以上の研究成果については、第 61 回地盤工学シンポジウム (2018) ⁷⁾ において公表済みである。

第2章の参考文献

- 1) 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：2018年9月8日）。
- 2) 小山内 信智，内田 太郎，曾我部 匡敏，寺田 秀樹，近藤 浩一：簡易貫入試験を用いた崩壊の恐れのある層厚推定に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，第261号，2005。
- 3) 鏡原 聖史，澁谷 啓，鳥居 宣之，金 秉洙，川尻 峻三：兵庫県北西部地域における2009年台風9号による山腹斜面崩壊の実態と発生メカニズムについて，地盤工学ジャーナル，第8巻，3号，pp.489-504，2013。
- 4) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 JGS 0561-2009 土の圧密定圧一面せん断試験方法，pp.675-676，2009。
- 5) 河上 房義，森 芳信，柳沢 栄司：土質力学（第8版），森北出版株式会社，pp.135-137，2012。
- 6) 菊本 統，西村 聡，早野 公敏：図説 わかる土質力学，学芸出版社，pp.181-183，2015。
- 7) 山口 滉平，中村 大，川口 貴之，川尻 峻三，宋 白楊：寒冷地で発生した極表層をすべり面とする斜面崩壊の調査と安定解析，第61回地盤工学シンポジウム，2018。

第 3 章

X 線 CT スキャンを活用した 凍上過程における土の内部観察

3.1 X線CTスキャンの地盤工学分野への活用

近年、工業部品の欠陥検出などを目的として開発された、医療用に比べて高出力の産業用X線CTスキャン装置が、大学などの研究機関にも普及しつつあり、地盤工学分野においてX線CTスキャン装置が広く活用されるようになってきた。X線CTスキャンの非破壊で内部構造を観察できるという利点を生かして、自然の材料である土質材料のミクロな構造の解明を試みた研究（例えば、椋木ら¹⁾）や、種々の力学試験結果の解釈を試みた研究（例えばHigoら²⁾）も存在する。さらに、最近ではこれをマクロな土構造物の挙動の解釈に役立てようという試みも注目を集めている（例えば、大谷ら³⁾）。

本学においても2014年の装置の導入以降、X線CTスキャンを地盤工学分野において様々に利用してきた。例えば、川尻ら⁴⁾はベーンせん断強さの発揮メカニズムを解明するため、再構成した供試体に対してX線CTスキャン装置内でベーンせん断試験を模した実験を実施した。また、X線CTスキャン画像の出力値となるGL値のラインプロファイルを検証することによって、ベーン背面の状況を詳細に観察することに取り組んだ。三鍋ら⁵⁾は凍結融解履歴と浸透水による内部浸食が砂質土地盤材料の力学特性に与える影響について検討を行った。彼らは土試料流出前後の供試体に対して、X線CTスキャンを行い、得られたCT画像から流出前後での密度変化を確認した。

本研究ではX線CTスキャンを用いて、凍上した土の内部の様子を非破壊で、微視的に観察することを試みている。凍上過程における土をX線CTスキャンするためには、X線CTスキャン装置内で正確な温度制御や水分供給が可能で、CTステージ上に据え付けることが可能な小型の凍上実験装置を開発する必要がある。このため、未凍結状態の土と比較して、凍上過程における土のX線CTスキャンに関する研究事例は極端に少ない。唯一の先行研究としては、Torranceら⁶⁾をあげることができる。TorranceらはX線CTスキャナ装置内で土を凍上させることが可能な実験装置を開発し、その構造変化を観察することに取り組んだ。しかしながら、アイスレンズの成長の動的なプロセスを観察することができていないとともに、ボクセルサイズが43 μm と大きく、分解能が低いため、アイスレンズの詳細な観察はできていない。

3.2 凍上現象

ここではまず、土の凍上現象に関するこれまでの知見について、この分野の教科書である「凍土の物理学」⁷⁾と「寒冷地地盤工学—凍上被害とその対策—」⁸⁾を参考に詳述する。

3.2.1 凍上機構

図3-1は地盤の凍上機構について示して概略図である。冬期、気温が低下して地表面が0℃以下の気温に曝されると、地盤は凍結する。このとき、地盤を構成する土が凍上性を有しているとき、地盤中に凍結面が形成された状況下では、未凍土側から水分が凍結面に向かって移動していくこととなる。凍結面に集まった水分は凍結する際、土粒子を押し広げる形で氷の層が形成されるが、この氷の層をアイスレンズと呼ぶ。一般的には、凍上は上述のような凍結面に移動した水分の凍結と、それに伴うアイスレンズの形成によってもたらされるものと定義されている。

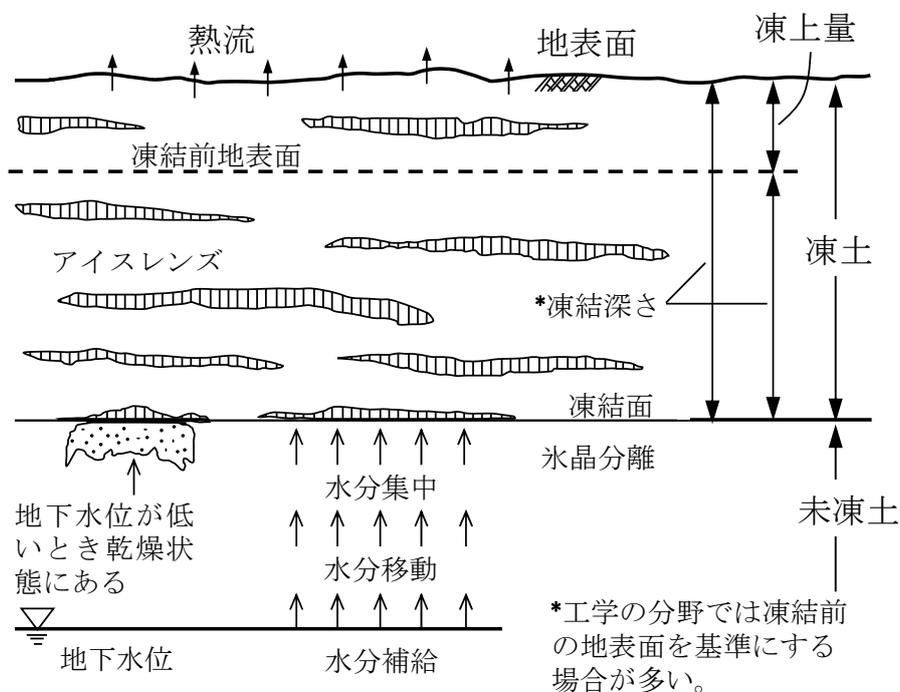


図3-1 地盤の凍上機構⁸⁾

3.2.2 凍上の3要素

一般的に、凍上現象に影響する因子は以下の3つにまとめられる。

(1) 温度

土の凍上は凍結面でアイスレンズが成長するときに発生する潜熱と、地表面からの冷却熱のバランスが取れた状態で発生する。この熱のバランスが取れて凍結面が停滞し、未凍土から水分供給が続く限り、アイスレンズは成長し続ける。気温が低下すると熱のバランスは崩れて、凍結面は深部に進行し、再び熱のバランスが取れた位置でアイスレンズが再度形成される。これが繰り返されることによって、アイスレンズは凍土内に縞状に形成されていくこととなる。一方、気温が低過ぎて凍結面の移動が速く、地下からの水分供給が間に合わない場合にはアイスレンズは形成されず、コンクリート状凍結となる。

(2) 水分

凍上が発生するには、アイスレンズを形成する水分が、凍結面に供給される必要がある。地下水位が高く、十分な水分供給が行われる場合、凍上量は大きくなる。一方、地下水位などの水分の供給源が近くに存在しなく、土が元から含有していた水分のみで凍上が発生する場合、凍上量は小さくなる。水分の供給源となる地下水位の影響は、その値が1 m以浅になると強く現れる。

(3) 土質

凍上が発生するためには、土がアイスレンズを形成する性質を持つこと、つまり凍上性の土である必要がある。土の凍上性は粒径との関係が強く、一般的に粗粒土と呼ばれる砂や礫は凍上性を持たない。土の凍上性は粒径0.1 mm以下のシルト、粘土で現れ、その凍上性は粒径が小さい程強くなるが、粒径が小さくなり過ぎると透水性が低くなるため、地盤としての凍上性は逆に小さくなる。

以上の温度、水分、土質の3つの因子を凍上の3要素と呼び、3つの要素全てが揃うことによって凍上が発生する。また、3つの要素のうち、どれか1つが欠けると凍上は発生しない。

3.2.3 凍上理論

図 3-2 は、凍上が起きている土中の様子を拡大した模式図であり、地盤が上から下に向かって凍結している様子を示している。下 1/3 は未凍土、中央の 1/3 はフローゼンフリンジと呼ばれる $0\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ほどの温度領域、上 1/3 は凍土を示している。また、上 1/3 と真ん中 1/3 の境界にはアイスレンズと呼ばれる氷の層があり、この層の厚さが、土が上方へと持ち上げられる量、すなわち凍上量である。

アイスレンズは $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ではなく、マイナスの温度で成長することが明らかとなっている。そのためには、図の下方の未凍土から間隙水が成長中のアイスレンズの成長面へ移動しなければいけない。仮に、マイナスの温度のフローゼンフリンジ中の水が全て凍っていたとすると、水は未凍土から成長中のアイスレンズへ流れることはできないことになる。これまでに、土中の水は $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下でもその一部が凍っていないことが実験的に確認されている（不凍水が存在）。また、この不凍水を介して水は未凍土からフローゼンフリンジを通過して成長中のアイス

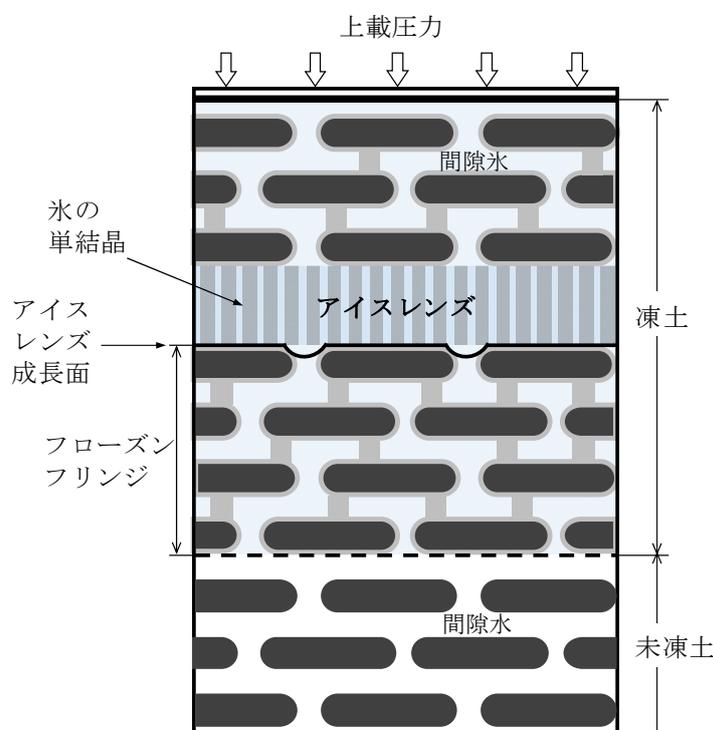


図 3-2 凍上の模式図⁸⁾

レンズへ移動することが可能であることも明らかとなっている。しかしながら、残念ながら、「なぜ水がそのように移動するか」という問いには明確な解が存在しない。

この問いに対する解を求めるため、土の凍上機構に関する研究は古くから行われてきた。例えば、Everett⁹⁾は、熱力学的平衡の原理を用いて凍上現象を説明した最初の研究者の1人である。Everettは凍上力が土粒子骨格からなる毛管内の氷と水の間界面張力によって生じると考えた。また、Miller¹⁰⁾はアイスレンズが凍結線(0°C)より低い領域で成長することを確認し、これをフローズンフリンジと定義した。さらに、Miller および Gilpin¹¹⁾は一般化された Clausius-Clapeyron 式を用いて、フローズンフリンジ中の熱と水の移動を考慮した凍上モデルを提案した。以上のように、凍上に関するモデルや理論は数多く発表されているものの、これらに関する検証は十分に行われていない。

3.3 実験概要

上述したように、本研究では凍結融解作用が植生工に及ぼす影響を明らかにすることを最終目標としており、植物根系の発達状況や、凍上現象が根系や土そのものに与える影響を把握する手段として、X線CTスキャンを活用することを試みている。

ここではその足掛かりとして、X線CTスキャンを用いて、凍上した土の内部の様子を非破壊で、微視的に観察することに取り組んだ。このため、X線CTスキャン装置内で土を一次元凍結させることのできる、小型の凍上実験装置を開発した。X線CTスキャン装置内で土を凍上させることにより、凍上過程における土のX線画像を3次元的に取得することができる。また、本研究で用いたX線CTシステムは、マイクロフォーカスX線発生装置と高感度X線検出器を搭載しており、凍上した土の内部の様子を非破壊で、微視的に観察することが可能である。以上の研究手法により、アイスレンズ生成に伴う土の密度変化といった凍上現象が土に与える影響を把握することを試みている。なお、本研究で撮影されたX線CTスキャン画像は、土の凍上機構を明らかにする一助となることも期待できる。

3.3.1 供試体の作製

写真3-1に本研究で用いた風化火山灰、段丘堆積物、火山灰質砂の3種類の土試料を示す。これらは全て北見市周辺で採取したもので、地盤工学会基準¹²⁾に基づくと、風化火山灰と段丘堆積物は火山灰質粘性土に分類され、火山灰質砂は細粒分質礫質砂に分類されている。



写真 3-1 3種類の土試料

図3-3に粒度試験結果を示す。風化火山灰は2mmふるい、段丘堆積物と火山灰質砂は10mmふるいを通過したものを実験に使用した。つまり、風化火山灰は礫分を含まないように、段丘堆積物と火山灰質砂は少量の礫分を含むように調整した試料である。ただし、風化火山灰と段丘堆積物の2種類の試料は、特に細粒分に関しては、概ね同様の粒度分布を有している。一方、火山灰質砂は粒度分布が異なり、粗粒分が多く細粒分が少ない。図3-4には各試料の締固め試験結果を示し、表3-1には試料の物理的特性を示す。

本研究ではモールドとピストンを用いて締固めを行い、再構成した供試体で実験を行った。ここで用いたモールドは円筒形で、内径21mmである。このモールドに最適含水比に調整した土試料を投入し、締固め度 $D_c=95\%$ を目標として、モールドと同じ直径のピストンで締固めた。締固めは5層で行っており、1層の厚さは10mmである。完成した供試体の寸法は概ね直径 $\phi=21$ mm、高さ $h=50$ mmとなる。本研究では供試体直径を小さくしているが、これはX線画像撮影時にX線が透過し易くするためである。

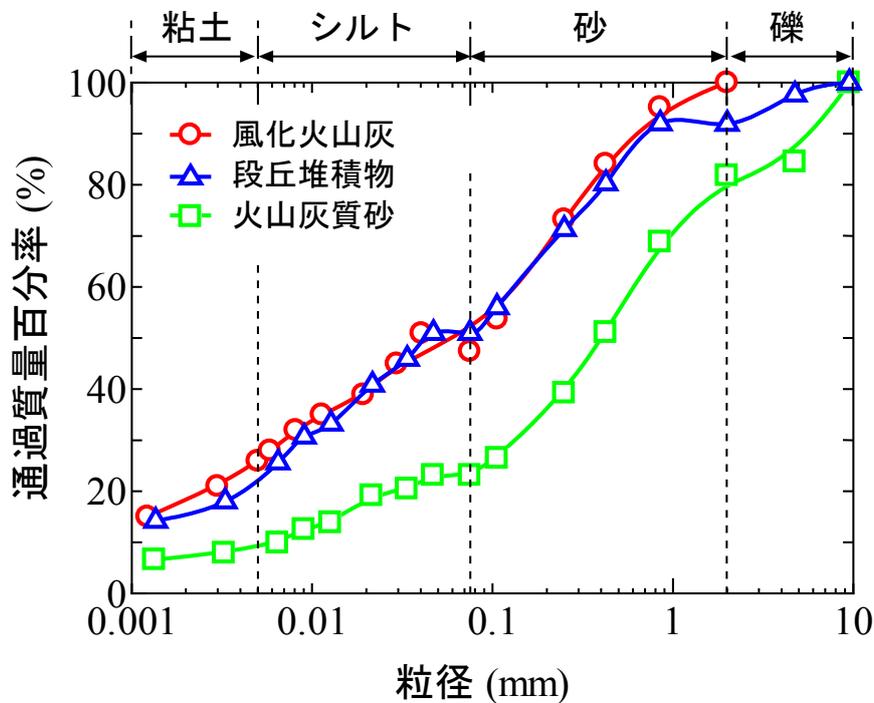


図3-3 粒度試験結果

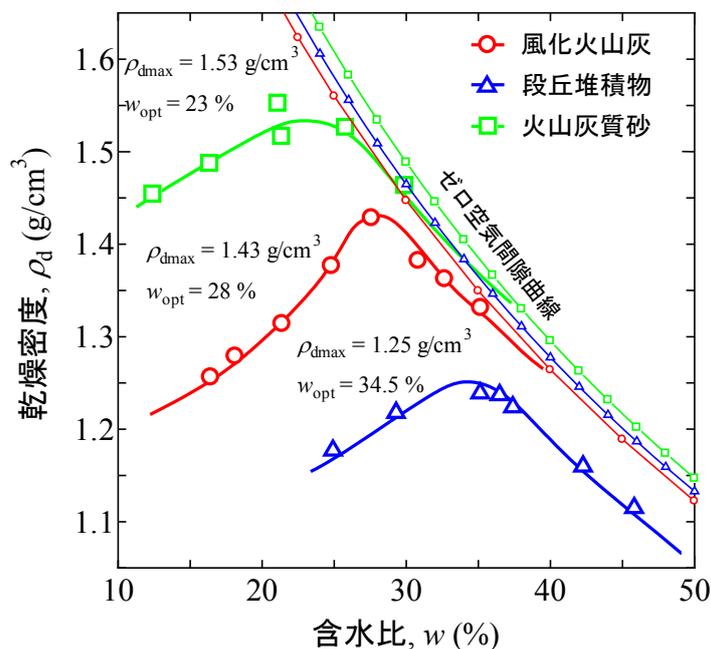


図 3-4 締固め試験結果

表 3-1 土試料の物理的特性

試料	粒度 (%)				細粒分 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)
	粘土	シルト	砂	礫				
風化火山灰	25	25	50	0	50	2.557	28.0	1.43
段丘堆積物	23	27	41	9	50	2.613	34.5	1.25
火山灰質砂	9	15	56	20	24	2.684	23.0	1.53

3.3.2 凍上実験装置

図 3-5 に本研究で作製した凍上実験装置を示す。凍結方法はペルチェ素子冷却板を用いて、地盤工学会基準¹³⁾と同様に供試体を底面から冷却した。凍結時の冷却板の温度については、供試体が過冷却状態となってしまうことを防ぐため、概ね-10℃で制御した。凍上に必要な水分については供試体の上面から供給している。ただし、供給される水の温度は、供試体上面を温度制御していないため、室温(+20℃)とほぼ同じ温度である。供試体側面については、断熱材を設置して外気温の影響を受けないよう工夫している。

実験中は図3-5のように設置した4本の熱電対で、供試体底面および上面の温度、供試体の内部温度を計測している。計測された温度データは、X線CTスキャン外部に設置したデータロガーで1分毎に収録される。

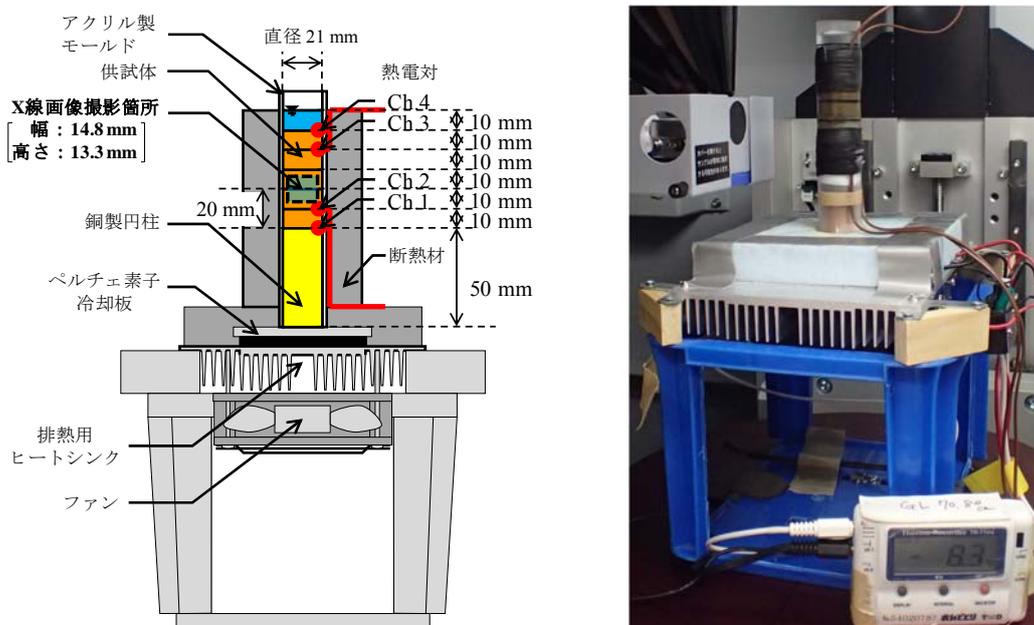


図3-5 凍上実験装置概要図と設置状況

3.3.3 X線CTスキャン

(1) X線CTスキャン装置の原理

X線CTスキャンの基本原理について以下に詳述する。まず、X線管がX線ビームを放射し、選択された面を複数の方向から走査して、検出器がX線の透過量を受信して測定する。そして、この値をアナログデジタル変換器でデジタル信号に変換し、コンピュータに転送して記憶させて計算する。この時点で、平面の各単位体積のX線吸収値が得られる。その後、デジタルアナログ変換器を介したコンピュータ逆投影再構成により、吸収値がX線CTスキャン画像に変換される。最後に、X線CTスキャン画像がディスプレイによって表示される。

(2) CT値

ここでは、肥後ら¹⁴⁾を参考に、X線CTスキャンの解釈に広く用いられているCT値について詳述する。一般的にCT値は以下の式で表される。

$$\text{CT 値} = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \times 1000 \quad (3-1)$$

ここで、CT値はHounsfield Units (HU)で表され、 μ は撮影対象のX線の吸収係数であり、 μ_w は水の吸収係数である。空気は密度がほぼゼロであり、X線の減衰はほとんどないので μ もゼロとなるため、CT値は-1000 HUとなる。また、水のCT値は0 HUとなる。したがって、ある点におけるX線の吸収量は、CT値で表すことができる。なお、本試験装置においてCT値は、X線CTスキャン画像の輝度値（グレイレベル Gray Level, GL値）で表される。X線CTスキャン画像の明るい色は被測定物の吸収係数が大きい領域を示し、濃い色は被測定物の吸収係数が小さい領域を示している。つまり、X線CTスキャン画像は、対象物のある走査面のX線吸収係数の2次元分布であると考えることができる。

また、撮影対象のX線の吸収係数は以下の式で定義される。

$$\mu = \mu_m \rho \quad (3-2)$$

ここで、 μ_m は物質に固有の質量吸収係数、 ρ は物質の密度である。これはおなじ物質であれば、密度が高いほどX線の減衰率が大きくなることを示している。したがって、X線CTスキャン画像は密度分布図として考えることができ、実験中の物質の密度変化をCT値の変化として定量的に表現することが可能である。

(3) 本研究に用いたX線CTスキャン装置の概要

図3-6にX線CTスキャン装置の構造図を示す。本研究に用いたX線CTスキャン装置は島津製作所製「inspeXio SMX-225CT」である。本装置は測定対象を破壊することなく内部構造を観察・検査するためのマイクロフォーカスX線CTシステムである。マイクロフォーカスX線発生装置とイメージインテンシファイア (Image Intensifier)、高精度ステージを搭載しており、X線透視検査やCTスキャンができる¹⁵⁾。表3-2にX線CTスキャン装置の主な仕様を示す。

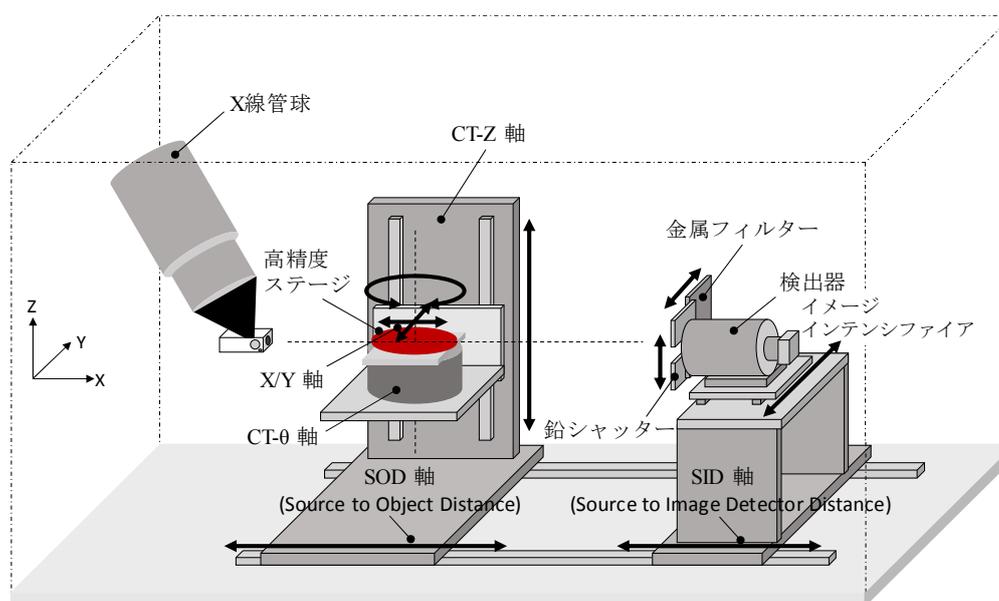


図 3-6 X線CTスキャン装置の構造図¹⁵⁾

表 3-2 X線CTスキャン装置の仕様

最大管電圧 (kV)	225	搭載サンプルの最大寸法 (mm)	φ300×H300
最大管電流 (μA)	1000	搭載サンプルの最大質量 (kg)	9
定格出力 (W)	135	検出器の入力視野寸法 (inch)	9/7.5/6/4.5
画像分解能 (μm)	4	画像サイズ	512 ² , 1024 ² , 2048 ²

(4) 凍上実験装置の設置状況と X線CTスキャン条件

図 3-7 に X線CTスキャン装置と凍上実験装置の設置状態を示す。凍上実験装置は図のように X線CTスキャン内の CTステージ上に固定し、土を凍上させながら X線CTスキャン画像を撮影した。撮影条件は管電圧 160 kV, 管電流 40 μA, ボクセルサイズ 0.029 mm である撮影箇所は供試体底面から 20 mm の位置で、撮影範囲は幅 14.8 mm, 高さ 13.3 mm である。撮影は配線の都合上、ハーフスキャン (ステージが 180° 回転) で実施した。表 3-3 に本研究の X線CTスキャン条件についてまとめる。

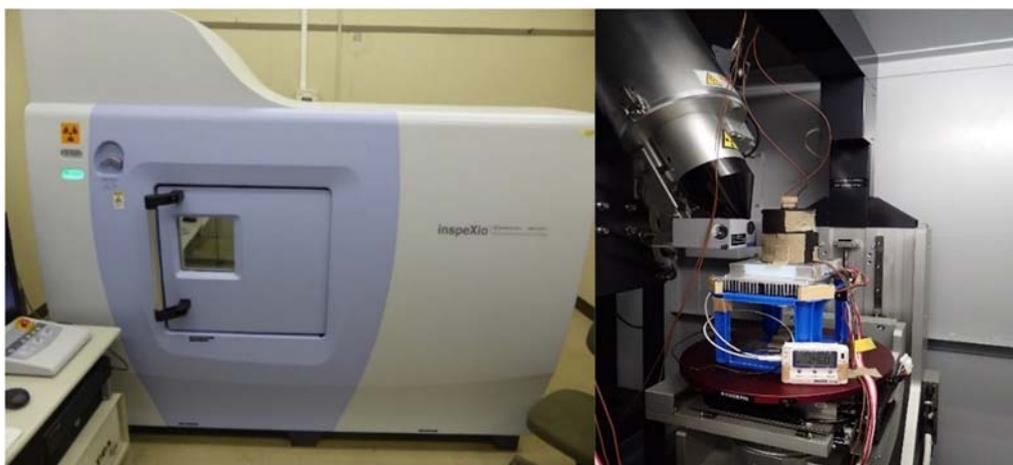


図 3-7 X線CTスキャン装置と凍上実験装置の設置状態

表 3-3 X線CTスキャン条件

管電圧 (kV)	160	画像サイズ	512×512
管電流 (μA)	40	ビュー数	3600
ボクセルサイズ (mm)	0.029×0.029×0.029	アベレージ数	10

(5) 本研究で使用した解析ソフト

本研究では、凍上過程における土の内部観察を行うため、3次元解析ソフトのExFact VR 2.0¹⁶⁾を用いた。この解析ソフトでは、X線CTから得られた断層画像をボリュームレンダリングにより2次元/3次的に可視化することができる(図3-8)。

X線CTスキャンは、断層画像を連続的にデジタルデータとして出力する。CTデータとは、回転する試料に対して、透過/吸収/散乱を経て検出された電磁波を「信号」として収集し、それをさらに数学的に再構成して得られた「解」の配列である。本解析ソフトは、その配列を画素とみなし、輝度情報を関連付け、見易いコントラストを設定して、「画像」として表示するものである。

デジタル画像は、輝度が記録された画素が格子状に連続して成り立っている配列データである。各画素は8 bit ($2^8=256$ 階調)、16 bit ($2^{16}=65536$ 階調) といった深さを持つ情報で、X, Y, Z 方向の画素数を解像度という。デジタル画像

を使ってものを観察する際、画素が最小単位かつ分解能の限界であり、長さや面積を計測する場合も、この1画素のサイズが精度上の根拠となる。3次元画像では、3次元の画素をボクセル (voxel)、3次元的に連続した配列データをボリュームデータという。画像上において、試料は信号のレベルに応じた輝度値 (グレイレベル Gray Level, GL 値) で表現される¹⁷⁾。

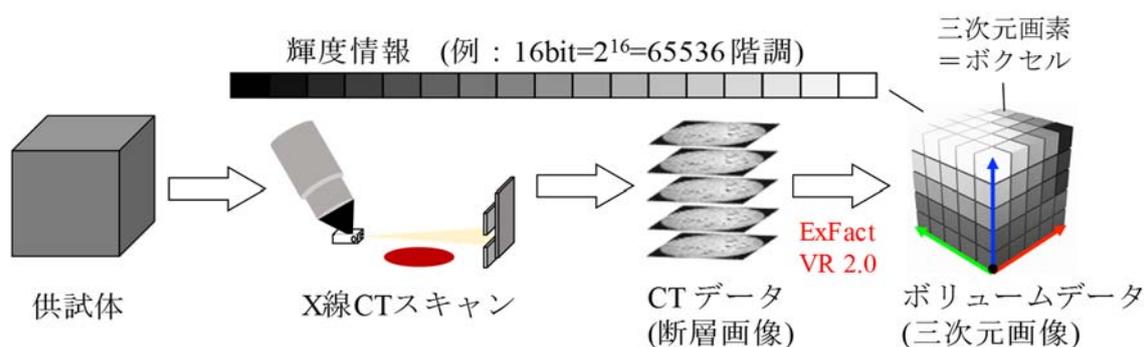


図 3-8 ソフトウェアによる3次元視覚化の模式図¹⁷⁾

3.4 実験結果および考察

3.4.1 凍上量，吸水量および温度の経時変化

図 3-9 に 3 種類の土試料の凍上量，吸水量および供試体の内部温度の経時変化を示す。全ての実験において，凍結中の温度変化（および温度勾配）は概ね同様であることがわかる。具体的な内部温度は，上から順に+13 °C，+10 °C，-4 °C，-10 °C であることが確認できる。このことから，X 線画像撮影箇所（図 3-5 参照）は，温度変化が平衡状態となっているとき，0 °C の領域を含む Ch.2 と Ch.3 の熱電対の間に位置することがわかる。

上述のように，凍結中の温度勾配が同様であるにも関わらず，凍上量には大きな差が見られた。なお，凍上量は，供試体に X 線 CT スキャンを行って，供試体上面の位置を読み取ることで測定している。各土試料の具体的な凍上量の変化を見ると，風化火山灰の凍上量は実験開始から 24 時間後に 6.2 mm，段丘堆積物の凍上量は実験開始から 48 時間後に 5.5 mm，火山灰質砂の凍上量は実験開始から 26 時間後でもわずか 2 mm であった。この結果は，表 3-1 に示す細粒分含有

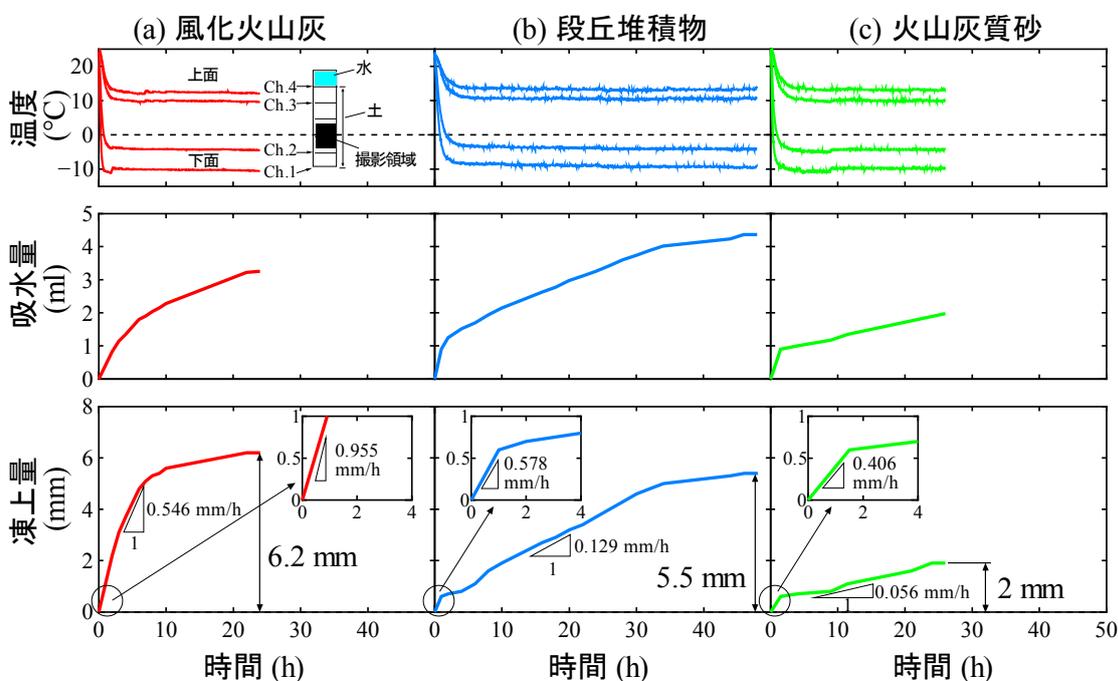


図 3-9 凍上量，吸水量および供試体の内部温度の経時変化

率が大きく影響しているものと考えられる。風化火山灰および段丘堆積物はいずれも約50%の細粒分含有率を有しており、これは火山灰質砂のそれ（細粒分含有率24%）より、極めて大きいことがわかる。また、凍上量は細粒分含有率の増加に伴って、増加傾向であることが確認できる。

凍上速度については、全ての供試体において、凍結開始直後（1時間以内の間）に、凍上速度が急速に上昇していることがわかる。具体的な凍上速度は、風化火山灰で0.955 mm/h、段丘堆積物で0.578 mm/h、火山灰質砂で0.406 mm/hであった。このとき、供試体の内部温度は常温から急速に降下しており、これに伴って凍結線（0℃）も高速で上方へと移動している。供試体内部は熱のバランスが取れないため、厚いアイスレンズは形成されないものの、凍結線の移動に伴って薄いアイスレンズが連続的に形成されものと考えられる。

一方、実験開始1時間後には、各供試体の凍上速度が大きく変化していることがわかる。具体的な凍上速度は、風化火山灰で0.546 mm/h、段丘堆積物で0.129 mm/h、火山灰質砂で0.056 mm/hであった。このとき、風化火山灰および段丘堆積物ではアイスレンズの発生により、土が外部から水分を吸い込み始めており、最終的な凍上量を決定するのは、このプロセスであると考えられる。凍上速度の大小関係についても、表3-1に示されている細粒分含有率とよく一致していることも確認できる。なお、風化火山灰の凍上速度は段丘堆積物のそれよりも幾分か大きかったが、これは段丘堆積物が9%の礫分を含有していることに起因しているものと考えられる。

実験中の吸水量の変化については、凍上量の変化とよく一致していることがわかる。なお、吸水量も凍上量と同様に、供試体にX線透視画像を行って、水面の位置を読み取ることで測定している。

3.4.2 凍上過程における土の内部観察

図3-10はX線CTスキャンによって得られた凍上過程における各供試体の3次元再構成画像をまとめたものである。上述したように、X線CTスキャン画像では輝度が濃淡で表され、低密度部分は黒色で、高密度部分は白色で示される。このため、氷や水といった低密度の物質は黒色で、土粒子などの高密度の物質は白色で表される。

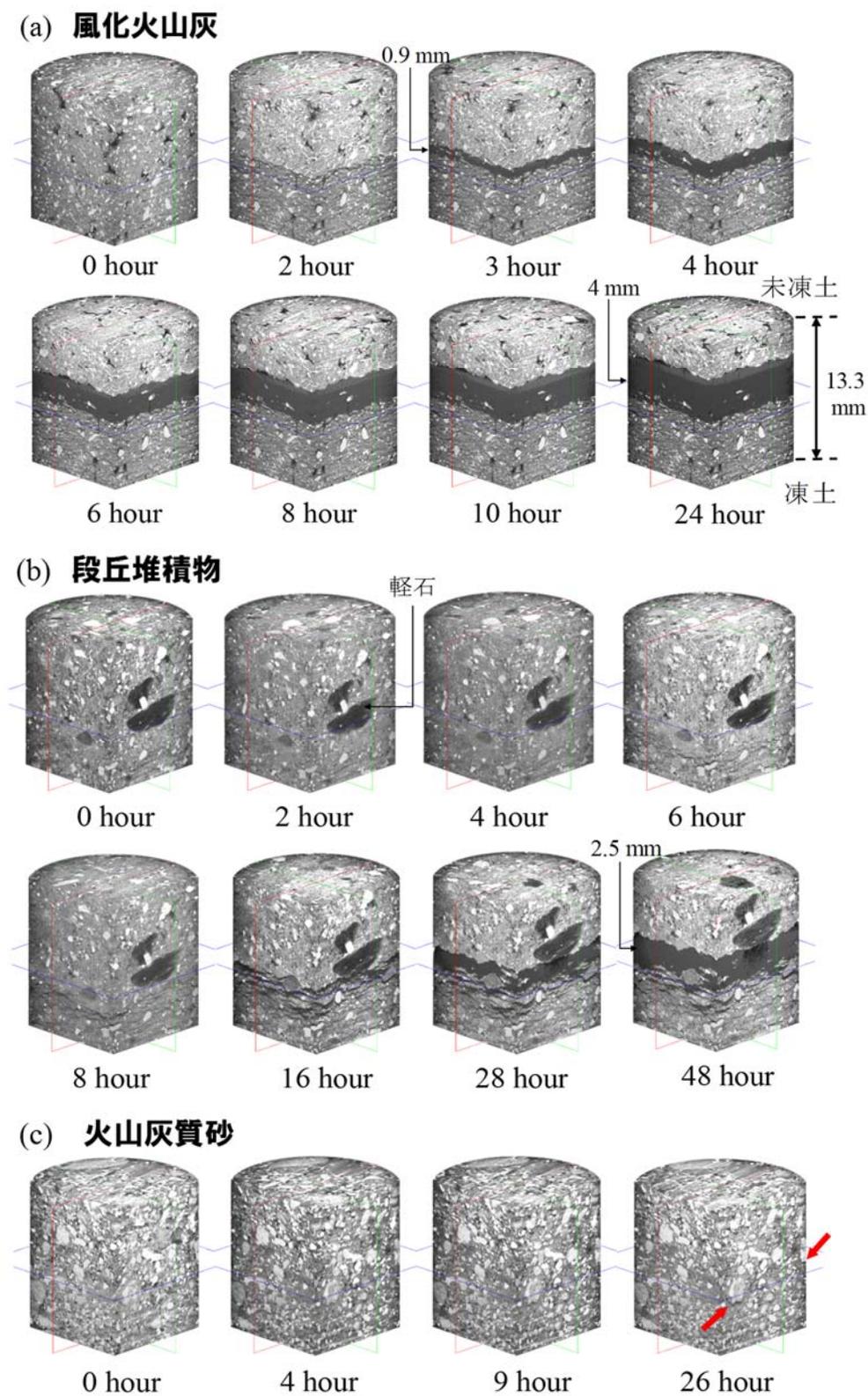


図3-10 凍上過程における各供試体のX線CTスキャン画像

図 3-10 (a)から、風化火山灰では実験開始から 2 時間後までは凍結線が移動中であり、複数のクラック状のアイスレンズが発生していることがわかる。その後、3 時間後には凍結線が停滞し始め、徐々に厚いアイスレンズが成長し始めていることが確認でき、24 時間後には約 4 mm の厚いアイスレンズに成長している様子が確認できた。また、礫分を含まない風化火山灰では比較的フラットな形状のアイスレンズが形成されていくことが観察された。

図 3-10 (b)から、段丘堆積物では実験開始から 16 時間後に、明瞭なアイスレンズが一つ発生していることがわかる。このアイスレンズは時間の経過とともに成長していくものの成長速度は遅く、48 時間後でもその厚さは約 2.5 mm にしか達していない。ただし、段丘堆積物ではアイスレンズより下方の凍結領域においても、クラック状のアイスレンズが成長していく様子を確認することができる。礫分を含む段丘堆積物ではアイスレンズが大きな粒子の周りから形成されていく様子が観察でき、アイスレンズは風化火山灰に比べて凹凸のある形状であった。

図 3-10 (c)から、火山灰質砂ではアイスレンズが発生しておらず、実験開始から 26 時間後においても薄いクラックが確認できるのみであった。これは火山灰質砂が凍上性を示さない粗粒分で構成されてためだと考えられる。

さらに、図 3-10 の 3 次元再構成画像を、厚さ 0.317 mm (11 ボクセル) の円柱形でスライスし、各スライスの輝度値 (Gray Level, GL 値) の平均を求め、供試体の高さ方向の変化を求めた。先述したように、本試験装置での出力値である輝度値は、X 線吸収量と比例関係を取るため、輝度値と密度の増減は対応していると考えることができる。

図 3-11 に各供試体の GL 値の高さ方向の変化について示す。GL 値の変化から、風化火山灰では実験開始から 2 時間後には凍結線が高さ 6 mm の位置に移動し、凍結部分の密度が減少していることがわかる (図 3-11(a))。これは土中にアイスレンズが析出することによって土粒子が押し広げられ、相対的に密度が低下したためだと考えられる。その後、実験開始から 3 時間後には、凍結面に集まった水分によって、アイスレンズが形成され始めていることがわかる。その後、アイスレンズは徐々に成長し、24 時間後には約 4 mm の厚いアイスレンズに成

長している様子が確認できた。また、段丘堆積物も風化火山灰同様に、実験開始から6時間後に凍結線が高さ4mmの位置に移動し、凍結部分の密度は減少していることがわかる(図3-11(b))。一方、火山灰質砂では、これを構成する土が粗粒分で、凍上性を有しないこともあり、概ねGL値の変化は確認できなかった。

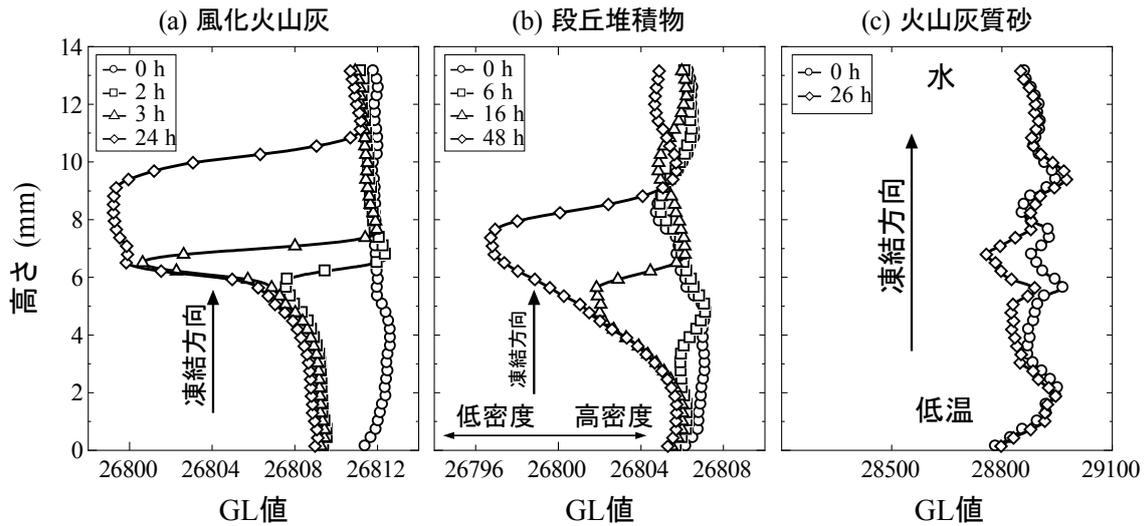


図 3-11 各供試体の輝度値のプロファイル

3.5 まとめ

X線CTスキャン装置内で土を一次元凍結させることができる凍上実験装置を開発し、凍上過程における土の内部の様子を、X線CTスキャンで観察することに取り組んだ。この内部観察により、土中にアイスレンズが形成されていく過程や、アイスレンズそのものの形状などを詳細に観察することが可能となった。また、X線CTスキャン画像から得られるGL値の変化を捉えることで、アイスレンズ生成に伴う土の密度変化についても把握することができた。得られた知見についてについて、以下にまとめる。

- 凍上性の高い風化火山灰では、実験の初期段階において、複数のクラック状のアイスレンズが発生していることが観察できた。また、凍結線が停滞し、熱のバランスが取れた状態では、厚く発達したアイスレンズを観察することができた。礫分を含まない風化火山灰では比較的フラットな形状のアイスレンズが形成されていくことが観察された。
- 礫分を含む段丘堆積物ではアイスレンズが大きな粒子の周りから形成されていく様子が観察できた。また、形成されたアイスレンズは風化火山灰に比べて凹凸のある形状であった。
- 凍上性を示さない粗粒分で構成された火山灰質砂では凍上は発生せず、アイスレンズも観察されなかった。
- 凍上性を有する風化火山灰と段丘堆積物では、凍結部分のGL値が低下していることがわかった。これは土中にアイスレンズが析出することによって土粒子が押し広げられ、相対的に密度が低下するためだと考えられる。

以上の研究結果から、凍上現象が土に与える影響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明らかとなった。

以上の研究成果については、Congress on Technical Advancement 2017: Cold Regions Engineering¹⁸⁾において公表済みである。

第3章の参考文献

- 1) 椋木 俊文, 藤見 俊夫, 松本 英敏 : 地盤材料を対象とした X 線 CT データの EM アルゴリズム解析による間隙内流体材料の領域分割と混合率の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.555-567, 2014.
- 2) Yosuke Higo, Fusao Oka, Sayuri Kimoto, Taisuke Sanagawa, Yoshiki Matsushima : Study of strain localization and microstructural changes in partially saturated sand during triaxial tests using microfocus X-ray CT, Soils and foundations, Vol.51, No.1, pp.95-111, Vol.9, 2011.
- 3) 大谷 順, 永谷 英基, 高野 大樹 : X 線 CT を用いたトンネル切羽崩落機構の評価, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.814-824, 2006.
- 4) 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 スキャンによるベーンせん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.
- 5) 三鍋 佑季, 川尻 峻三, 川口 貴之, 高柳 剛, 阪東 聖人, 太田 直之 : 浸透水と凍結融解履歴を受けた不飽和砂質土の内部浸食が力学特性に与える影響, 不飽和土研究会研究発表論文集, pp.21-28, 2016.
- 6) J.K. Torrance, T. Elliot, R. Martin, R.J. Heck : X-ray computed tomography of frozen soil, Cold Regions Science and Technology, Vol.53, pp.75-82, 2008.
- 7) 木下 誠一 : 凍土の物理学, 森北出版, 1982.
- 8) 地盤の凍上対策に関する研究委員会 : 寒冷地地盤工学—凍上被害とその対策—, 地盤工学会北海道支部, 2009.
- 9) Everett, D. H. : The thermodynamics of frost damage to porous solids, Transactions of the Faraday Society, Vol.57, pp.1541-1551, 1961.
- 10) Miller, R. D. : Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils, Highway Research Record, Vol.393, pp.1-11, 1972.
- 11) R. R. Gilpin : A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils, Water Resources Research, Vol.16, No.5, pp.918-930, 1980.

- 12) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 JGS 0051-2009 地盤材料の工学的分類方法, pp.54-59, 2009.
- 13) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 JGS 0172-2009 凍上性判定のための土の凍上試験方法, pp.230-234, 2009.
- 14) 肥後 洋介, 高野 大樹, 椋木 俊文: X線CTから見る土質力学 2. X線CT, の概要と研究動向, 地盤工学会誌, Vol.65, No.10, pp.41-48, 2017.
- 15) 島津製作所：マイクロフォーカス X線CTシステム inspeXio SMX-225CT 取扱説明書 基本操作編, 2013.
- 16) 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, 2007.
- 17) 滝 克彦, 千 容星, 岩瀬 昌之：三次元画像処理のためのソフトウェア技術の実際, 日本ビジュアルサイエンス株式会社 論文集.
- 18) Baiyang Song, Dai Nakamura, Takayuki Kawaguchi, Shunzo Kawajiri, Satoshi Yamashita, Dahu Rui: Internal Observation of Soil in Frost Heave Process Using the X-Ray CT Scan, Congress on Technical Advancement 2017: Cold Regions Engineering, pp.71-78. 2017.

第 4 章

凍結融解履歴を受けた植物根系を 含む土のせん断特性に関する基礎 的研究

4.1 実験概要

本章では、凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性を把握しうる試験方法を確立するため、その足掛かりとして生育の速さや観察の容易さ等を考慮し、コマツナの根系を含む土供試体の簡易定圧一面せん断試験やX線CTスキャンによる観察を行った。

本研究では、植物根系による土の補強効果を一面せん断試験で、土中の植物根系の発達状況をX線CTスキャンで把握することに取り組んだ。X線CTスキャンを活用することで、土中の根系を乱さずに観察・定量化することができる。また、供試体に凍結融解履歴を与える方法としては地盤工学会基準に準拠した凍上試験方法を用いており、凍上現象が根系や土そのものに与える影響を把握する手段としても、X線CTスキャンを活用している。

ここでは、根系を含まない供試体（以下、土供試体）と、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）を作製し、それぞれの一部には凍結融解履歴を与えている。また、全てのケースにおいて、供試体を浸水、飽和させた後に2種類の鉛直応力で簡易定圧一面せん断試験を行った。加えて、各試験の前後には必ずX線CTスキャンを行い、供試体内部の根系の状態を非破壊で観察した。

図4-1は例として、根系含有土供試体に対して凍結融解履歴を与えた場合の試験手順と各試験装置について示したものである。以下に、各試験手順について詳述する。

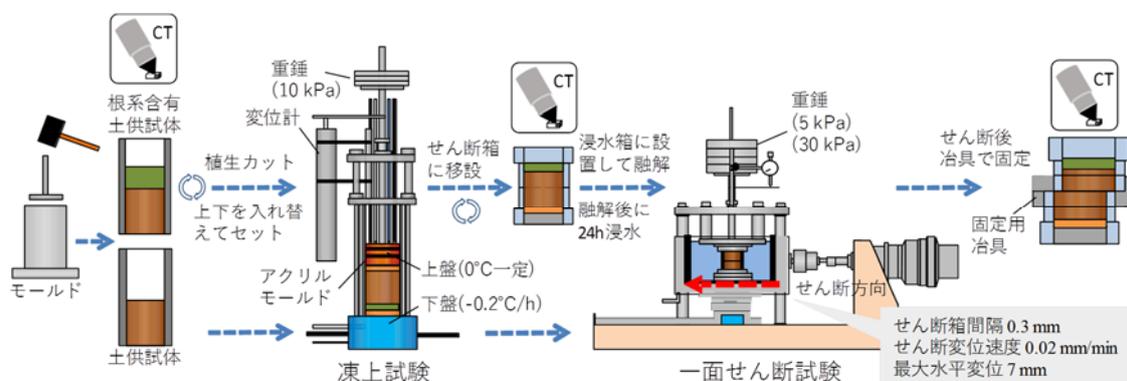


図4-1 凍結融解履歴を与えた供試体の試験手順

4.1.1 供試体の作製

実験に用いた土試料は北見市内で採取した「火山灰質粘性土」に分類される風化火山灰である。基本的な物性値は、土粒子の密度 $\rho_s = 2.56 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt} = 28\%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.43 \text{ g/cm}^3$ である。また、地盤工学会基準「凍上性判定のための土の凍上試験方法」¹⁾に準拠した凍上試験によって高い凍上性 ($U_h \approx 0.7 \text{ mm/h}$) を有することを確認しており、試験には 0.85 mm ふるい通過分を使用した。

供試体は内径 60 mm の金属モールドとプラスチックハンマーを用いた動的締固めで作製した。土試料は含水比 $w = 30\%$ に調整し、目標締固め度を $D_c = 85\%$ (乾燥密度 $\rho_d = 1.22 \text{ g/cm}^3$) として、下部3層は層厚 20 mm 、上部1層のみ層厚 10 mm の計4層で締固めた (供試体高さ: 約 70 mm)。作製した全ての供試体は播種を行うか否かに関わらず、根系が侵入し易いよう、上部1層分 (10 mm) だけを攪拌した。

根系含有土供試体については、透明アクリル円筒に移して供試体表面に $1 \text{ 粒} / 1.8 \text{ cm}^2$ (合計 16 粒) の割合で点播し、コンテナ底部に設置した多孔板の上で生育させた。コンテナは北見工業大学敷地内の屋外に設置し、土の流亡を防ぐためにろ紙を敷設した供試体底面から約 10 mm の高さまでが常に水浸するよう調整した。そして、土と植物の乾燥具合や天候を考慮して、一つの供試体につき $3 \sim$

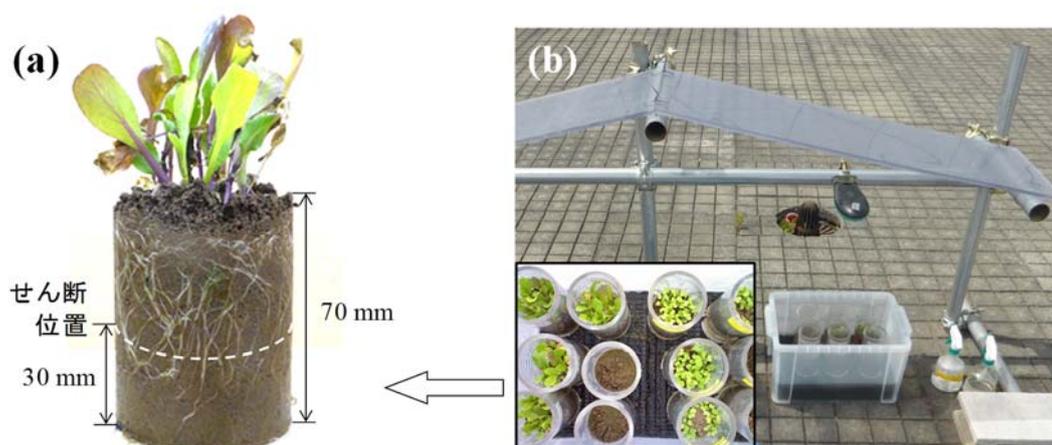


写真 4-1 (a) 播種から2ヵ月後経過した根系含有土供試体の様子と
(b) 屋外での植生の育成の様子

6 g の水を適宜噴霧した。生育期間は保有する試験装置の稼働状況等を考慮し、2015年6～9月の中で供試体ごとに異なっている（概ね2カ月）。また、供試体は屋外で植物を生育させた後、実験室内で保管した。保管日数も試験スケジュールの都合上、供試体ごとに異なっている（最大約1カ月）。

写真4-1は播種から2カ月後の根系含有土供試体の様子と屋外で植生の育成の様子であり、良好に生育していることが確認できる。本研究では試験方法の確立を目的としていることもあり、生育が速くて栽培も容易であること、さらに根系が太いためにX線CTスキャンによる観察にも適していることを考慮し、植物にはコマツナ (*Brassica rapa var. perviridis*) を採用した。

4.1.2 凍結融解試験

図4-2は本研究で用いた凍上試験の装置である。凍結過程については、図4-1に示したようにいずれの供試体についても作製時の上面が凍上試験装置の下盤に接するように上下を入れ替えて装置内に設置し、凍上試験を行った。これは地盤工学会基準において、上盤とモールドとの凍着を防ぐために、下盤から冷却させることが規定されているためである。なお、根系含有土供試体については予め

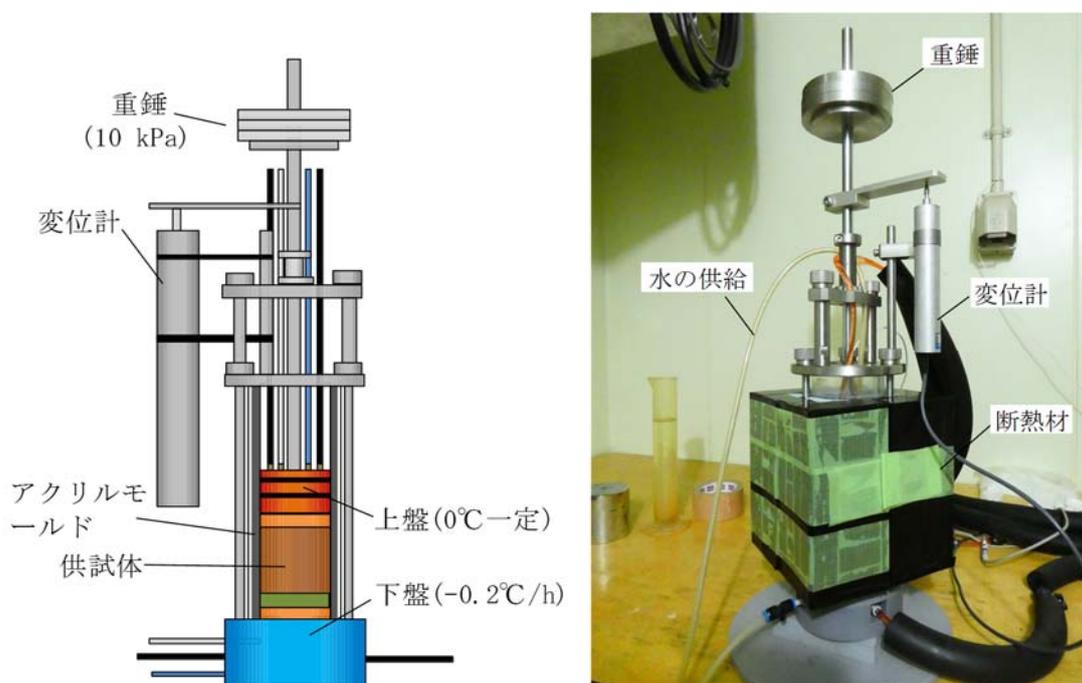


図4-2 凍上試験装置

生育した茎葉部を根本でカットしている。また、重錘による鉛直応力は 10 kN/m^2 とし、上盤側面にはグリース、モールド内面にはシリコンスプレーを噴霧して摩擦低減を図っている。

凍結方法については、基本的に地盤工学会基準¹⁾に準拠しており、上下盤の温度を 0°C で24時間保持し、その間に吸水量と排水量が概ね一致するまで、下盤から通水して供試体を飽和させた。その後、サーマルショックを与えて氷核を形成させた後、凍上変位が停滞するまで下盤温度を一定速度 (-0.2°C/h) で降下させた。

融解過程については、凍上試験装置内ではなく、一面せん断試験装置内で実施した。具体的には、凍上した供試体を凍結させたまま凍上試験装置から取り外し、供試体の上下を元に戻して一面せん断試験装置内のせん断箱へ移設した。次に、重錘によって一面せん断試験と同じ鉛直応力 ($5 \text{ or } 30 \text{ kN/m}^2$) を与え、 $+2^\circ\text{C}$ に制御された恒温室内で沈下量が収束するまで融解させた。この時、浸水箱は水で満たしておらず、アイスレンズの融解で発生する水分は加圧板と反力板に設置された多孔板を通じて浸水箱内に排水される。

4.1.3 簡易定圧一面せん断試験

写真 4-2 は一面せん断試験の様子である。本研究では、土被り圧の小さいのり面表層の強度特性を明らかにすることを目的としているため、低鉛直応力下で一面せん断試験を行う必要がある。しかしながら、その場合に地盤工学会基準「土の圧密定圧一面せん断試験方法」²⁾で規定されているように、鉛直応力の変動率を圧密応力の $\pm 3\%$ 以下とすることは極めて困難である。そこで、せん断箱内面の周面摩擦力によるせん断面上の鉛直応力の変化を把握できるよう、反力板側に設置した荷重計で鉛直応力を計測した上で (図 4-1 参照)、重錘によって加圧板に与えた鉛直応力をせん断中に制御しない、いわゆる簡易定圧試験を採用した。なお、大島ら³⁾は鉛直応力を反力板側で測定すれば、簡易定圧試験でも (真の) 定圧一面せん断試験とほぼ同じ強度定数が得られることを報告しており、破壊時のせん断応力と鉛直応力の関係を求める目的であれば、この方法は先述の地盤工学会基準²⁾でも認められている。

そこで、重錘によってせん断箱内に設置した供試体に与えた鉛直応力については（融解過程から一面せん断試験終了まで）、根系が侵入しているのり面表層での土被り圧を想定した 5 kN/m^2 （以下、低鉛直応力）と、これと比較して供試体のせん断強度に占める根系の影響が小さくなることが想定される 30 kN/m^2 （以下、高鉛直応力）とした。一面せん断試験の条件については、全ての試験で上下せん断箱間隔 0.3 mm 、せん断変位速度 0.02 mm/min 、最大水平変位 7 mm とした。

また、本研究では春期の融雪水等を含んだ表層地盤を想定しているため、せん断試験前に浸水箱を水で満たし、24 時間浸水させて供試体を飽和させている。加えて、せん断位置は共通に底面から 30 mm の位置とした（写真 4-1 参照）。これについては、研究の足掛かりとして、X 線 CT スキャンによる撮影も踏まえ、締固め後に攪拌した最上層（厚さ 10 mm ）を除いて供試体の中央部に近く、締固め作製時の層境界に近くない（層中央の）方が一面せん断時における根系の影響が把握しやすいと考えたためである。

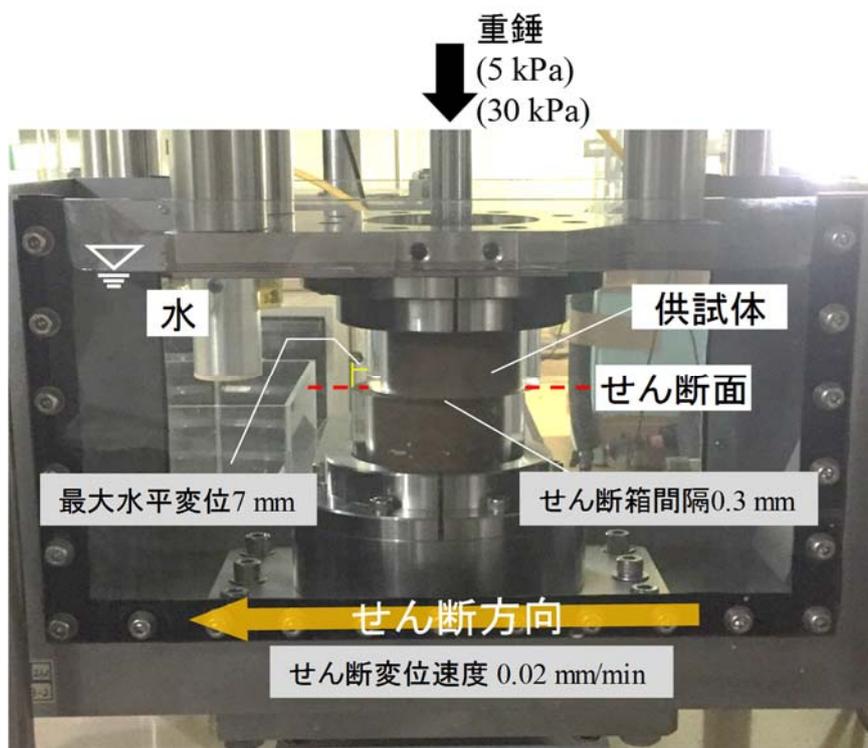


写真 4-2 一面せん断試験の様子

4.1.4 X線CTスキャン

表 4-1 に X 線 CT スキャン条件を示す。本研究では X 線 CT スキャン装置 (SHIMADZU inspeXio SMX-225CT) を用いて、供試体内の根系を非破壊で観察した。X 線 CT スキャン装置の詳細については前章を参照されたい。一連の試験開始時における根系の侵入状況や、凍結融解後や一面せん断試験後における根系の状況を観察するために適宜実施した (図 4-1 参照)。なお、凍上試験後については、供試体が凍結したまま、アイスレンズを含んだ状態で実施している。また、せん断試験後については、上下せん断箱にずれ (7 mm) が生じた状態のまま固定できる専用の治具を用いて観察した。

表 4-1 X線CTスキャン条件

	試験前	凍上後	融解後	せん断後
管電圧 (kV)	180	180	180	180
管電流 (μA)	60	50	50	50
画像サイズ	512×512			
ビュー数	1200			
アベレージ数	10			
ボクセルサイズ (mm)	0.167	0.226	0.173	0.173

4.2 実験結果及び考察

表4-2と表4-3は根系含有土供試体の生育条件と本研究で実施した試験結果をまとめたものである。表中の積算気温は大学敷地内で実測した気温から、その他の水文・気象環境条件はアメダス北見の気象データ⁴⁾から算出した値である。本来であれば、同条件で数多くの試験を行うべきであるが、先述のように装置の稼働状況や生育環境及び生育期間等を考慮して表中に示す試験数に留まっている。また、生育期間や時期によって根系の乾燥質量にもばらつきが見られる。ただし、全ての根系含有土供試体で、複数の根系がせん断位置を超えて供試体底面まで達していたことは、試験前の観察やX線CTスキャンで確認できており、根系の発達状況そのものに大きな違いは無いと考えられる。以下に、各試験結果について詳述する。

表4-2 根系含有土供試体の生育条件

供試体名	植物生育期間 (植物生育日数 (d))		試験日 (供試体室内 保管日数 (d))		積算 気温 (°C)	積算 日照 時間 (h)	積算 降水量 (mm)
A(根系含有)	6/18~8/10	(53)	8/10	(0)	1078	277	122
B(根系含有)	6/18~8/10	(53)	8/13	(3)	1078	277	122
C(根系含有)	6/18~8/10	(53)	8/15	(5)	1078	277	122
D(根系含有)	6/18~8/10	(53)	8/16	(6)	1078	277	122
H(根系含有)	7/24~9/25	(63)	9/25	(0)	1249	275	240
I(根系含有)	7/24~9/25	(63)	10/1	(6)	1249	275	240
J(根系含有)	7/24~9/25	(63)	10/13	(18)	1249	275	240
K(根系含有)	7/24~9/25	(63)	10/31	(36)	1249	275	240

表 4-3 根系含有土供試体の根系乾燥質量と試験結果一覧

供試体名	凍結融解履歴	根系乾燥質量 (g)	一面せん断試験時の間隙比 e	鉛直応力 (kN/m ²)	最大せん断応力 τ_{\max} (kN/m ²)
A(根系含有)	無	0.34	1.02	5	14.0
B(根系含有)		0.28	1.05	5	15.7
C(根系含有)		0.17	1.01	30	29.2
D(根系含有)		0.22	1.08	30	30.6
E(土のみ)		-	1.03	5	10.8
F(土のみ)		-	0.99	5	12.6
G(土のみ)		-	1.07	30	25.7
H(根系含有)	有	0.15	1.08	5	8.8
I(根系含有)		0.16	1.09	5	8.6
J(根系含有)		0.19	1.02	30	30.4
K(根系含有)		0.06	0.98	30	33.8
L(土のみ)		-	1.13	5	8.7
M(土のみ)		-	1.01	30	33.1

4.2.1 凍結融解試験

図 4-3 は凍結融解試験時における変位量の推移を比較したものであり、図 4-2(a)は融解時の鉛直応力が 5 kN/m² (低鉛直応力)、図 4-2(b)は 30 kN/m² (高鉛直応力) である。いずれの供試体においても、凍結開始から約 48 時間後までの凍上量は概ね一致していることが確認できる。例外的に、供試体 H, I では、上盤付近でアイスレンズが厚く発達したため、最大凍上量が若干大きくなっている。ただし、観察の結果から、いずれの供試体もせん断位置付近に形成されたアイスレンズの量は概ね同等と考えている。また、凍上で発生する膨張力(凍上力)は、使用した植物の根系による拘束力に比べて格段に大きいこともあり、根系の有無に関わらず、凍上速度は概ね一定となっている。

次に、融解沈下挙動に着目すると、低鉛直応力 (5 kN/m^2) では凍上変位が残留し、凍上試験前よりも供試体長が大きくなっている。ここで、根系含有土供試体の方が凍上変位の残留量が大きいことについては、低鉛直応力下では根系が沈下に幾分抵抗したためであると推察される。一方、高鉛直応力 (30 kN/m^2) では凍上試験前よりも供試体長が小さくなっている。これは、供試体を低い締固めエネルギー (締固め度 $D_c=85\%$) で作製していることが大きく影響しており、凍結融解によって土の構造が脆弱化し、融解時に大きな鉛直応力を受けたことで間隙が大きく閉塞したためと考えられる。また、根系の抵抗力に比べて鉛直応力が大きいためか、この時の融解沈下挙動には土供試体と根系含有土供試体に大きな違いは見られない。なお、表 4-3 には一面せん断開始時の間隙比も示しており、作製時等に生じたばらつきもあるが、高鉛直応力での試験については、凍結融解履歴を与えた供試体 (J, K, M) の方が、与えていない供試体 (C, D, G) よりも間隙比が幾分小さい傾向にあることが確認できる。

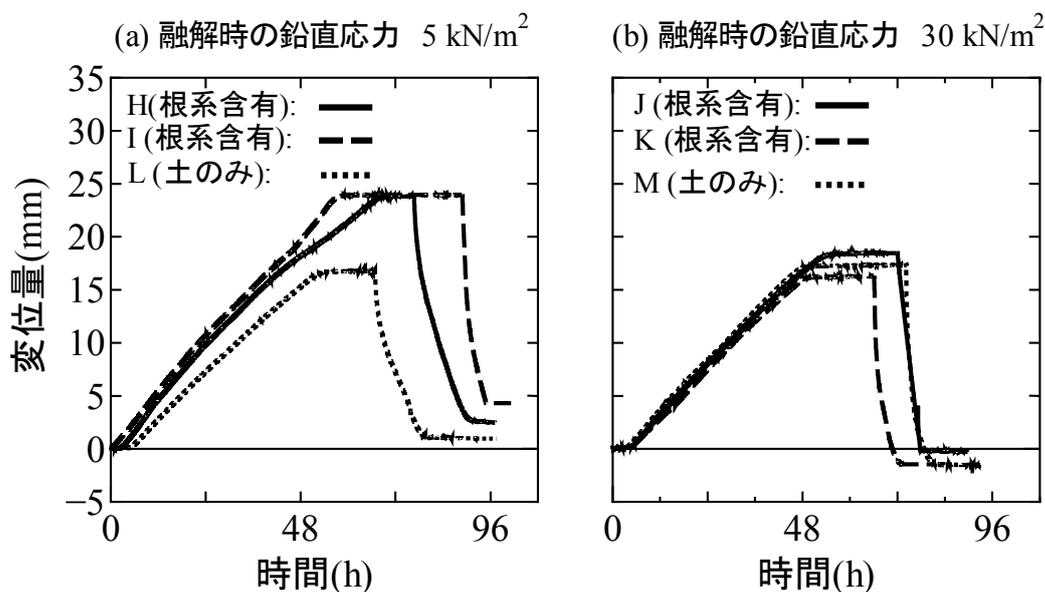


図 4-3 凍結融解試験結果 ((a)高鉛直応力, (b)低鉛直応力)

4.2.2 簡易定圧一面せん断試験結果及び考察

図 4-4 は簡易定圧一面せん断時における鉛直応力 σ , 鉛直変位 ΔH , せん断応力 τ の推移を比較したものであり、図 4-4(a)は凍結融解履歴を与えていない供試体

(以下、未凍結供試体)、図4-4(b)は凍結融解履歴を与えた供試体(以下、凍結融解供試体)の試験結果である。

また、図4-5は図4-4に示した各試験におけるせん断応力の最大値とそのときの鉛直応力の関係をプロットしたものであり、図4-4と同様に図4-5(a)は未凍結供試体、図4-5(b)は凍結融解供試体の試験結果である。なお、図中には根系を含まない土供試体のみを近似した直線も示している(角度と縦軸の切片はせん断抵抗角と粘着力に相当する)。

図4-4中のせん断変位 δ に伴う τ の変化に着目すると、未凍結供試体では特にせん断変位が大きな領域において、根系含有土供試体の τ が土供試体に比べて大

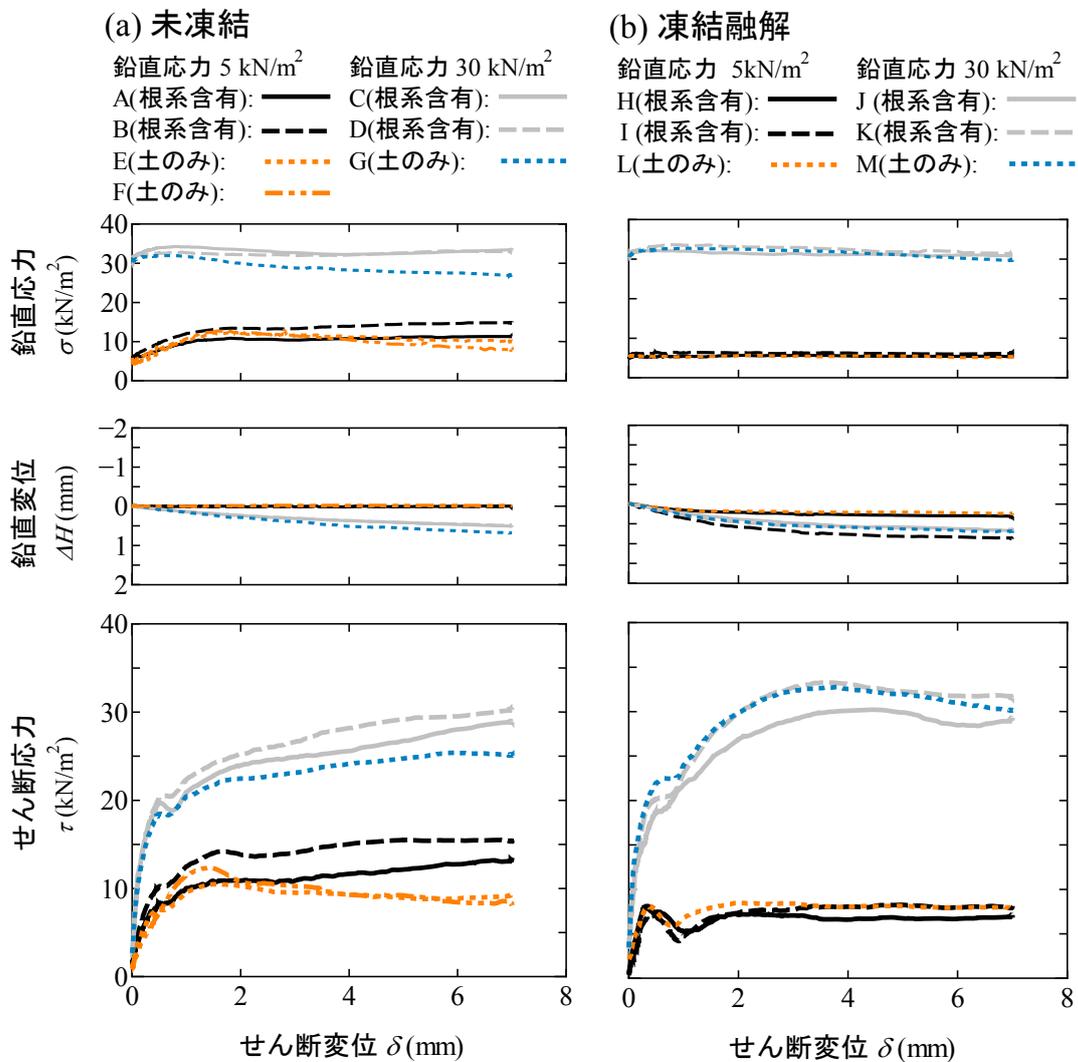


図4-4 (a)未凍結供試体 (b)凍結融解供試体における一面せん断試験結果

きいことがわかる(図4-4(a))。しかし、厳密にはせん断中の σ は変化しているため、これを考慮するために図4-5中に示した各試験の τ と σ の関係で比較すると、高鉛直応力で実施された根系含有土供試体の試験結果(Δ)は概ね土供試体から得られた近似曲線上に位置するが、低鉛直応力での試験結果(∇)は近似曲線の少し上方に位置している。つまり、せん断中における σ の変化を考慮すれば、高鉛直応力下では根系含有土供試体と土供試体の τ に本質的な違いは無いが、低鉛直応力下では根系含有土供試体の τ が土供試体に比べてわずかに大きく、少なからず根系による増強効果が発揮されていると考えられる。一方、根系の強度はそれほど大きくないため、高鉛直応力下で土骨格のせん断強度が増加すると、その効果は確認できなくなると推察される。この結果については植物にコマツナを用いたことが要因である可能性もあるため、他の植物でも同様な試験を行って確認したいと考えている。また、特に低鉛直応力下で実施された試験において、せん断中の σ が比較的大きく増加していることについては、 ΔH の変化は小さいものの、供試体が膨張しようとしているためと考えられる(正のダイレイタンス一挙動)。

次に、凍結融解供試体では、いずれの鉛直応力においても τ と δ の関係にそれほど大きな違いは見られず(図4-4(b))、 τ と σ の関係においても根系含有土供

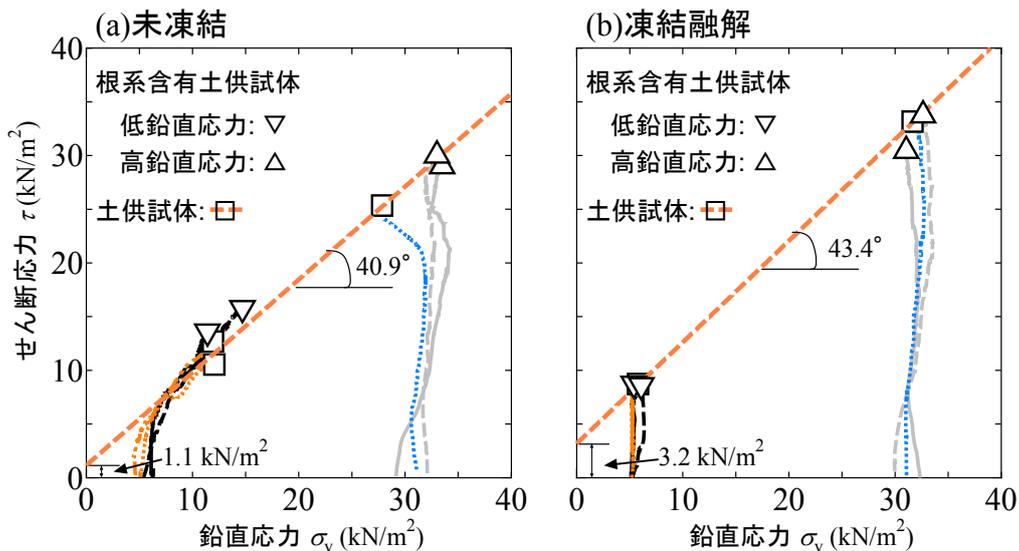


図4-5 (a)未凍結供試体、(b)凍結融解供試体における最大せん断応力と鉛直応力の関係

試体の試験結果 (Δ , ∇) は概ね土供試体から得られた近似曲線上に位置することがわかる (図 4-5(b))。すなわち、本研究で用いた植物では凍結融解によって根系による増強効果が失われたのではないかと推察される。よって、今後は実際の植生工で用いられている植物でも同様な試験を行っていきたいと考えている。

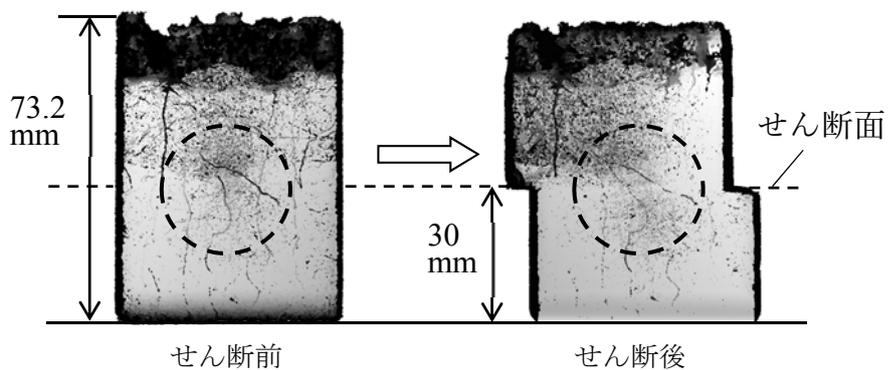
また、図 4-4 において、高鉛直応力下の試験におけるせん断中の τ は全般的に凍結融解供試体の方が大きいように見える。これについては、融解沈下に伴うせん断開始時における間隙比の違い (表 4-3 参照) や、凍結融解供試体の方がせん断中に生じた圧縮量が大きく、せん断中に間隙比が低下 (密度増加) したためと考えている (図 4-4 中の $\Delta H \sim \delta$ 関係参照)。

4.2.3 X線 CT スキャン

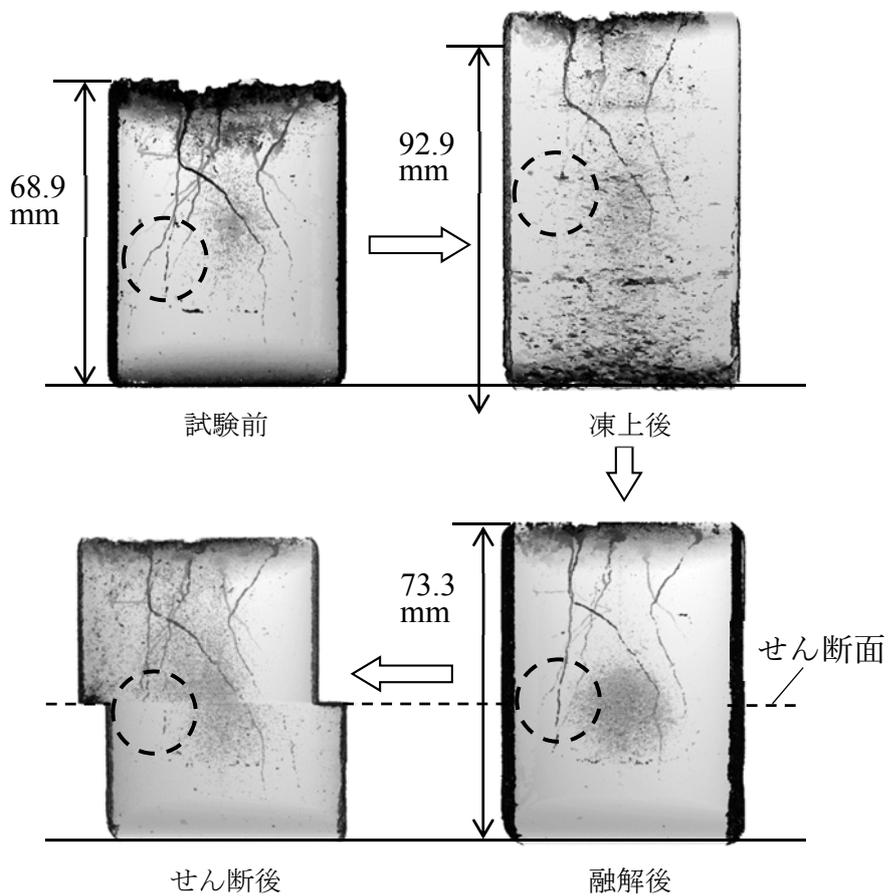
図 4-6 は低鉛直応力下で一面せん断を行った根系含有土供試体の X 線 CT スキャン画像であり、図 4-6(a)は未凍結供試体、図 4-6(b)は凍結融解供試体である。これらの画像は X 線 CT スキャンから得た断面画像を 3 次元的に再構成し、供試体中央から端部までの供試体内部を透過した画像である。また、低密度部 (主に根系) が黒色、高密度部 (主に土) が灰色で示されている。

図 4-6(a)において、円で示した領域に着目すると、一面せん断試験の前後で根系がせん断方向へ移動しているが、せん断面を跨いで根系が連続的に存在していることが確認できる。また、試験後の目視観察でも、せん断によって根系が切断されていないことを確認しており、根系がせん断に抵抗していることが窺える。これは低鉛直応力下において根系による増強効果が確認された未凍結供試体の一面せん断試験結果とも整合する (図 4-4(a), 図 4-5(a)参照)。

次に、図 4-6(b)中の円で示した領域に着目すると、供試体左側にある根系は、試験前から凍上後、更には融解後においても概ね同様の位置にあるが、せん断後には根系が不連続になり、せん断面を隔ててそのまま水平移動していることが窺える。これは凍結融解によって根系が損傷し、せん断に抵抗できなかったことを示していると考えられ、これについても凍結融解供試体では低鉛直応力下であっても根系による増強効果が確認されなかった一面せん断試験結果と整合する (図 4-4(b), 図 4-5(b)参照)。



(a) 未凍結の根系含土供試体
(供試体 B,せん断試験時の鉛直応力 5kN/m^2)



(b) 凍結融解履歴を与えた根系含土供試体
(供試体 I,せん断試験時の鉛直応力 5kN/m^2)

図4-6 各試験前後における根系含有土供試体の X線 CT スキャン画像
(a) 未凍結供試体, (b)凍結融解供試体)

4.3 まとめ

本研究では、凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性を把握しうる試験方法を確立するため、その足掛かりとして生育の速さや観察の容易さ等を考慮し、コマツナの根系を含む土供試体の簡易定圧一面せん断試験や X 線 CT スキャンによる観察を行った。得られた知見についてについて、以下にまとめる。

- 未凍結供試体において、低鉛直応力下でのみ根系による増強効果が確認され、せん断中における鉛直応力の変化を考慮しても、根系を含まない土供試体に比べてせん断強度がわずかに増加することがわかった。また、根系が切断されずにせん断に抵抗している様子が X 線 CT スキャン画像からも窺えた。
- 凍結融解供試体については、根系による増強効果は発揮されず、せん断強度に違いは見られなかった。また、X 線 CT スキャン画像からも凍結融解によって根系が損傷し、せん断に抵抗できないことが窺えた。
- 本研究で用いた植物（コマツナ）では凍結融解によって根系による増強効果が失われたのではないかと推察される。このことから、植生工に採用する植物によっては、凍結融解後に、根系による増強効果が期待できないことが明らかとなった。

本研究で実施した一連の試験方法によって、凍結融解履歴を受けた根系を含む土のせん断特性に関する定量的な評価や、根系に及ぼす凍結融解作用に関する定性的な評価がある程度可能になったと考えられる。

以上の研究成果については、緑化工学会誌 (2017)⁵⁾において公表済みである。

第4章の参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 JGS 0172-2009 凍上性判定のための土の凍上試験方法，pp.230-234，2009.
- 2) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 JGS 0561-2009 土の圧密定圧一面せん断試験方法，pp.675-676，2009.
- 3) 大島 昭彦，高田 直俊，坂本 佳理：一面せん断従来型定圧試験と真の定圧試験の比較，第31回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.665-666，1996.
- 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: 2017年5月21日）.
- 5) 川内谷 勇真，宋 白楊，中村 大，川口 貴之，川尻 峻三，山下 聡：凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む細粒土のせん断特性に関する基礎的研究，日本緑化工学会誌，Vol.43，No.1，pp.144-149，2017.

第 5 章

ケンタッキーブルーグラスの根系
が土のせん断強度に与える影響

5.1 実験概要

前章までの一連の研究により，X線CTスキャンを活用した，凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む土のせん断特性を把握しうる試験方法を確立することができた。ただし，生育の速さや観察の容易さ等を優先させて，前章で使用した植物はコマツナであった。

そこで本研究では，寒冷地での採用実績も多いケンタッキーブルーグラス (*Poa pratensis* L.) を用いて，生育期間や凍結融解履歴が異なる多くの供試体を作製して，低鉛直応力下での定圧一面せん断試験を実施した。また，一面せん断後の供試体を用いてX線CTスキャンを行うことで，根系の発達状況を観察し，これを用いたせん断試験結果の評価も試みた。ここで用いたケンタッキーブルーグラスはイネ科の多年草で，高い耐寒性を有している¹⁾。従来，北海道開発局で播種によるのり面緑化工を実施する場合，ケンタッキーブルーグラスはトールフェスク，クリーピングレッドフェスクに配合して用いられてきた²⁾。

表5-1は本研究で実施した試験条件をまとめたものである。実施した試験は全部で5ケースに分けられ，再現性を確認するために各ケース4供試体ずつ用意した(計20供試体)。本研究に用いた供試体は大きく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，ケース1,4)，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，ケース2,3,5)である。また，根系含有土供試体には，生育期間1カ月(ケース2)のものと，4カ月(ケース3,5)のものがある。さらに，土供試体(ケース4)と生育期間4カ月(ケ

表5-1 試験条件

ケース	供試体の種類	供試体名	植生生育期間	凍結融解
1	土供試体	S1~S4	-	無
2	根系含有土供試体	KBG1~KBG4	1カ月	無
3	根系含有土供試体	KBG5~KBG8	4カ月	無
4	土供試体	S5~S8	-	有
5	根系含有土供試体	KBG9~KBG12	4カ月	有

ース5)のものの一部については、凍結融解履歴を与えた。なお、供試体名については、土供試体にはS、根系含有土供試体にはKBGを付した。

5.1.1 土供試体の作製

試験に用いた土試料は、北見市内で採取した「火山灰質粘性土」に分類される風化火山灰であり、0.42 mmふるい通過分を使用した。土粒子の密度 $\rho_s = 2.56 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt} = 28 \%$ 、最大乾燥密度 $\rho_{dmax} = 1.43 \text{ g/cm}^3$ である。

播種の有無に関わらず、本研究で用いた全ての供試体は含水比 $w = 30 \pm 1 \%$ に調整した土試料を、湿潤密度 $\rho = 1.58 \text{ g/cm}^3$ となるよう1層当たりの質量を計算してモールド内に投入し、所定の層厚となるよう全断面ピストンをプラスチックハンマーで打撃することで作製した(締固め度 $D_c = 84.3 \sim 85.7 \%$)。なお、供試体は直径60 mm、高さ70 mmの円柱形であり、下3層は20 mm、上1層は10 mmとし、播種したもの(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層だけを幾分攪拌した。

5.1.2 根系含有土供試体の作製

写真5-1に屋外での植生の育成の様子を示す(根系含有土供試体)。表5-2および表5-3は、それぞれ根系含有土供試体の生育条件および根系含有土供試体の



写真5-1 屋外での植生の育成の様子

表 5-2 根系含有土供試体の生育条件

ケース	供試体名	植物生育期間	植物生育日数 (d)	試験日	室内保管日数 (d)	積算気温 (°C)	積算日照時間 (h)	積算降水量 (mm)
2	KBG1	9/3~10/3	30	11/28	56	455	166	103
	KBG2	8/21~10/3	43	10/12	9	704	211	113
	KBG3	9/3~10/3	30	10/25	22	455	166	103
	KBG4	8/21~10/3	43	10/19	16	704	211	113
3	KBG5	6/8~10/2	116	11/26	55	2062	565	339
	KBG6	6/8~10/2	116	1/4	94	2062	565	339
	KBG7	5/25~10/2	130	10/3	1	2228	628	419
	KBG8	5/25~10/2	130	10/10	8	2228	628	419
5	KBG9	6/8~10/2	116	12/4	63	2062	565	339
	KBG10	5/25~10/2	130	10/24	22	2228	628	419
	KBG11	5/25~10/2	130	10/30	28	2228	628	419
	KBG12	5/25~10/2	130	11/6	35	2228	628	419

表 5-3 根系含有土供試体の発芽数と根系乾燥質量

ケース	供試体名	発芽数 (本)	根系乾燥質量 (g)
2	KBG1	30	0.007
	KBG2	74	0.035
	KBG3	99	0.019
	KBG4	101	0.091
3	KBG5	50	0.135
	KBG6	70	0.124
	KBG7	113	0.236
	KBG8	124	0.258
5	KBG9	88	0.139
	KBG10	95	0.252
	KBG11	119	0.403
	KBG12	116	0.306

5.1.3 凍結融解試験

表 5-4 は本研究で与えた凍結融解履歴によって生じた最大凍上量および融解沈下量についてまとめたものであり、凍結融解履歴は土供試体と植物生育期間を4カ月に設定した根系含有土供試体の一部に与えた (S5~8, KBG9~12)。

試験方法については、基本的には第4章で実施した試験と同様であり、凍結過程は地盤工学会基準に準拠した凍上試験⁴⁾、融解過程は+2℃に制御された恒温温室に設置した一面せん断試験装置内で行った。なお、試験中の鉛直応力は常に10kN/m²とした。また、根系含有土供試体については試験開始前に茎葉部を根本でカットした。

写真 5-3 のように、上盤付近で厚く発達したアイスレンズによって、最大凍上量にはばらつきが見られるが、目視観察からせん断位置付近に形成されたアイスレンズの量は概ね同等であった。融解沈下量については、根系の有無に関わらず全ての供試体で最大凍上量よりも大きく、凍結融解によって密度増加が生じていることがわかる。これについては、締固め度が低いことが影響しており ($D_r \approx 85\%$)、凍上によって土の構造が脆弱化したためと考えられる。

表 5-4 最大凍上量、沈下量および供試体長の縮小量

ケース	供試体名	(a) 最大凍上量 (mm)	(b) 融解沈下量 (mm)	供試体長の縮小量 ((a)-(b)) (mm)
4	S5	17.0	17.1	0.1
	S6	6.3	7.7	1.4
	S7	7.2	8.4	1.2
	S8	12.2	12.4	0.2
5	KBG9	13.3	16.1	2.7
	KBG10	12.5	15.7	3.2
	KBG11	7.4	11.4	4.0
	KBG12	13.2	13.5	0.2



写真 5-3 凍上した根系含有土供試体

5.1.4 一面せん断試験

本研究で用いた一面せん断試験装置は、高さ 120 mm までの供試体が収納可能であり、スペーサーを用いてせん断面の位置を調整することが可能である。そこで本研究では、供試体に含有する根系全体がせん断強度に与える影響を把握することを目的として、先述した供試体（高さ 70 mm）を成形せずにせん断箱に収納して一面せん断試験を実施した。ただし、供試体高さが大きいと、せん断箱内面の周面摩擦力も大きくなるが、地盤工学会規準⁵⁾に準じて反力板側に設置した荷重計の計測値に基づいて定圧制御を行うことで、（真の）定圧一面せん断試験を実現した。なお、先述のように鉛直応力 σ は全ての試験で概ね地表面から 50 cm 深の土被り圧に相当する 10 kN/m^2 とした。この大きさは本研究で対象とするのり面表層で作用する土被り圧よりはわずかに大きいと考えられるが、先述の周面摩擦力が真の定圧制御に与える悪影響などを考慮し、可能な限り小さい値とした。また、上下せん断箱間隔は 0.2 mm、せん断変位速度は 0.02 mm/min、最大水平変位は 7 mm とした。せん断は 24 時間の浸水飽和後に行い、写真 5-1 に示すように、せん断位置は下から 2 層目中央とした（底面から 30 mm）。その他、試験装置や試験方法の詳細については、第 4 章を参照されたい。

5.1.5 X線 CT スキャン

表 5-5 は供試体内における根系の発達状況を把握する目的で実施した X 線 CT スキャンの条件をまとめたものである。本研究では事前に、供試体内のケンタッキーブルーグラスの根を顕微鏡で観察し、その最小直径が 0.09 mm であったことから、X 線 CT スキャンの解像度に相当するボクセルサイズを 0.028 mm にした。ただし、確認できた最小直径以下の根が存在する可能性も否定できないが、この場合に X 線 CT スキャンでの観察は不可能である。その他、使用した X 線 CT スキャン装置 (SHIMADZU inspeXio SMX-225CT) の詳細については、第 3 章を参照されたい。

表 5-5 X 線 CT スキャン条件

管電圧 (kV)	管電流 (μ A)	画像サイズ	ビュー数	アベレージ数
160	50	512×512	1200	12

5.2 実験結果及び考察

5.2.1 一面せん断試験

図 5-1 は定圧一面せん断時におけるせん断変位 δ に伴う鉛直応力 σ 、鉛直変位 ΔH 、せん断応力 τ の推移をケースごとに比較したものである（表 5-1 参照）。全ての試験において、せん断試験中の鉛直応力は圧密応力の $\pm 3\%$ 以下（9.7~10.3 kN/m²）に制御できていることがわかる⁵⁾。

土供試体の試験結果（図 5-1(a), (d)）は根系含有土供試体を用いた試験結果（図 5-1(b), (c), (e)）に比べてばらつきが小さく、再現性が高いことがわかる。また、このことから供試体間の τ や ΔH の違いは各供試体内に発達した根系の違いによるものだと窺える。

凍結融解履歴を与えていない3ケースを比較すると（図 5-1(a), (b), (c)）、 δ が小さな領域（2 mm 程度まで）では根系含有土供試体と土供試体のせん断挙動にそれほど大きな違いは見られないが、それ以降では大きな違いが見られ、根系含有土供試体では δ に伴って τ が上昇していることがわかる。また、生育期間が長いケース3（図 5-1(c)）の方がケース2（図 5-1(b)）に比べて τ の上昇が顕著であり、根系が発達することで、特に δ が大きい領域（大変形時）でのせん断抵抗が大きくなっており、靱性を向上させていることが窺える。ただし、詳細に観察すると、 $\delta=1\sim 2$ mm 程度で発揮されているピークについても、土供試体に比べると根系含有土供試体の方が幾分大きく、根系は δ の小さな領域でも少なからず増強効果を発揮していると解釈できる。

凍結融解履歴を与えた2ケースを比較すると（図 5-1(d), (e)）、先述した凍結融解履歴を与えていない3ケースと同様な傾向を示しており、根系の含有によるせん断抵抗の上昇が確認できる。また、凍結融解履歴の有無で比較すると、 $\delta=1\sim 2$ mm 程度で発揮されているピークは、土供試体（ケース1と4）と根系含有土供試体（ケース3と5）のそれぞれにおいて、凍結融解履歴を与えたケースの方が若干大きく、これは凍結融解によって生じた密度増加の影響だと考えられる。また、 δ が大きな領域でも大きな違いは見られず、凍結融解履歴によって根系が大きく損傷したような影響は確認できない⁶⁾。

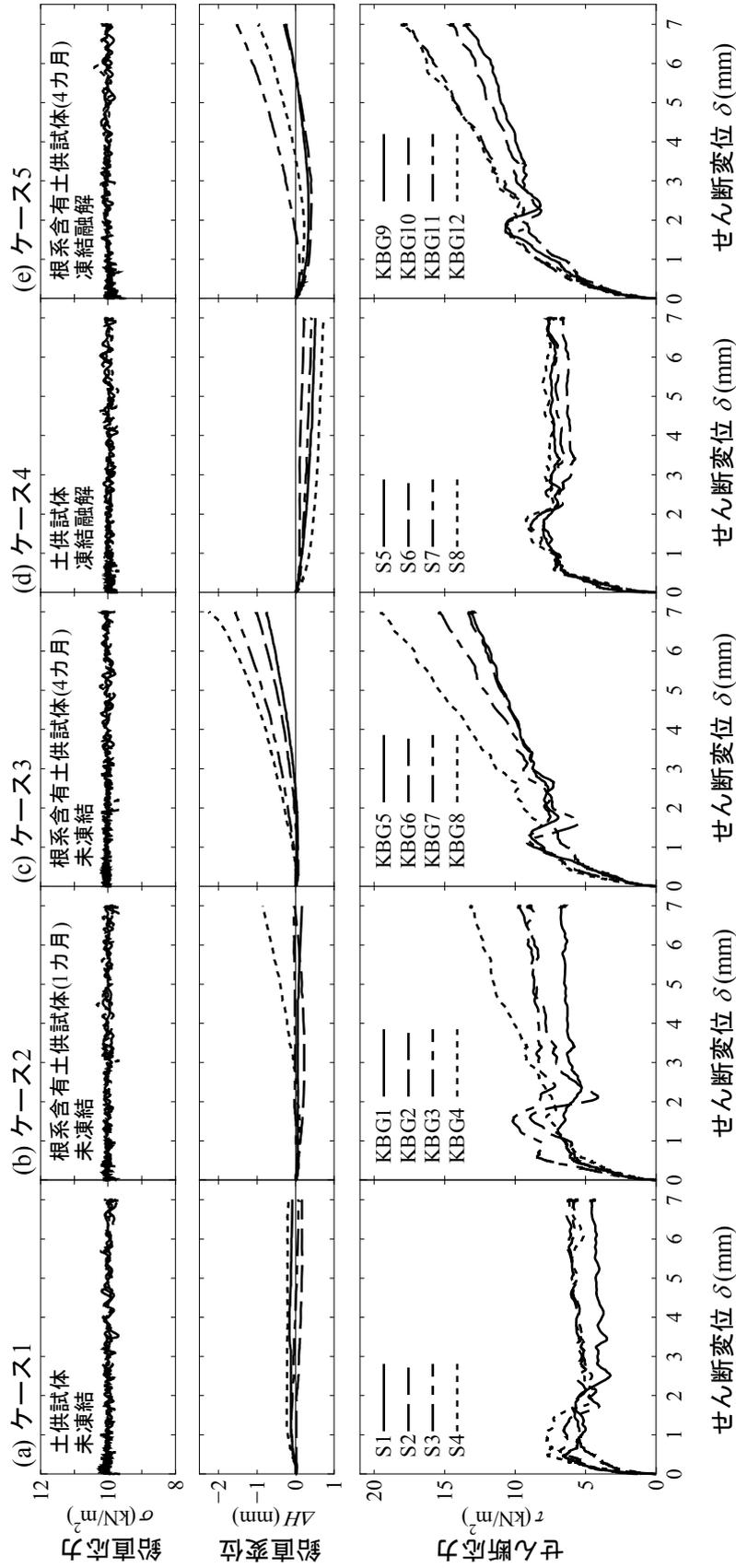


図5-1 全5ケースにおける定圧一面せん断試験結果

次に、各ケースにおけるダイレイタンスー特性に着目すると、根系含有土供試体の方が正のダイレイタンスー傾向を示しており、生育期間が長くなるほど顕著になっている。さらに、 δ の大きな領域で τ が大きくなっている供試体ほど、全般的に正のダイレイタンスー傾向も強く、その傾向は凍結融解履歴の有無によらないことがわかる。これについては、土供試体に対して根系と類似した補強効果をもたらすと推測される短繊維混合土に関して報告されているように、根系が土中に侵入したことでせん断帯が拡大したためだと推察している⁷⁾。ただし、凍結融解履歴の有無で比較すると、土供試体（ケース1と4）と根系含有土供試体（ケース3と5）のそれぞれにおいて、凍結融解履歴を与えたケースの方が幾分負のダイレイタンスー傾向にあることがわかる。これについては、凍結融解によって主として土構造が変化し、正規圧密的な挙動を示したためと考えている⁸⁾。

5.2.2 発芽数および根系乾燥質量

図5-2は各試験の最大せん断応力 τ_{max} と発芽数（図5-2(a)）および根系乾燥質量（図5-2(b)）との関係をプロットしたものである。なお、図中には根系含有土供試体のみ（ケース2,3,5）の試験結果を近似した直線も示している。発芽数および根系乾燥質量と τ_{max} の間には正の相関があるが、外観から確認できる発芽数に比べて根系乾燥質量との相関が強いことから、供試体内に含まれる根系

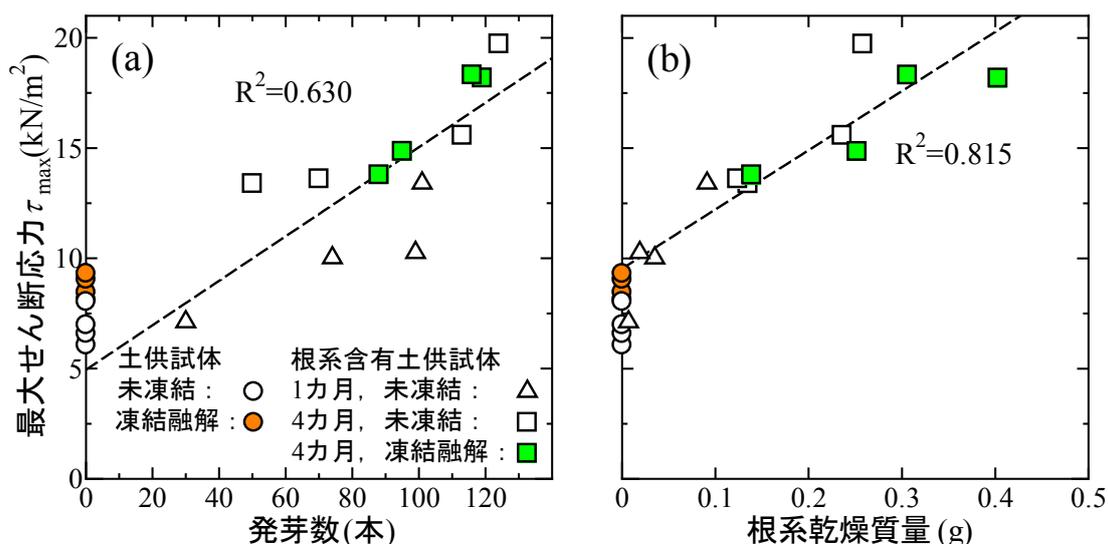


図5-2 最大せん断応力 τ_{max} と(a) 発芽数および(b) 根系乾燥質量の関係

の量や太さ等が供試体のせん断抵抗に直接的な影響を与えていることが窺える^{9),10)}。また、凍結融解履歴の有無による傾向の違いは特に見られないことがわかる。

5.2.3 X線CTスキャン

(1) 2次元投影画像から求めた根の本数、断面積を用いたせん断強度の評価

図5-3は各供試体における根系発達状況等を確認するため、一面せん断試験後の供試体に対して実施したX線CTスキャンの方法と、得られた3次元再構成画像を用いて簡易的に根の本数と直径を計測した方法を示した概略図である。本研究で用いたケンタッキーブルーグラスの根系は過去に撮影した植物の根系よりも細かったため⁶⁾、根系の判別が可能な精度の撮影画像を得るための工夫と

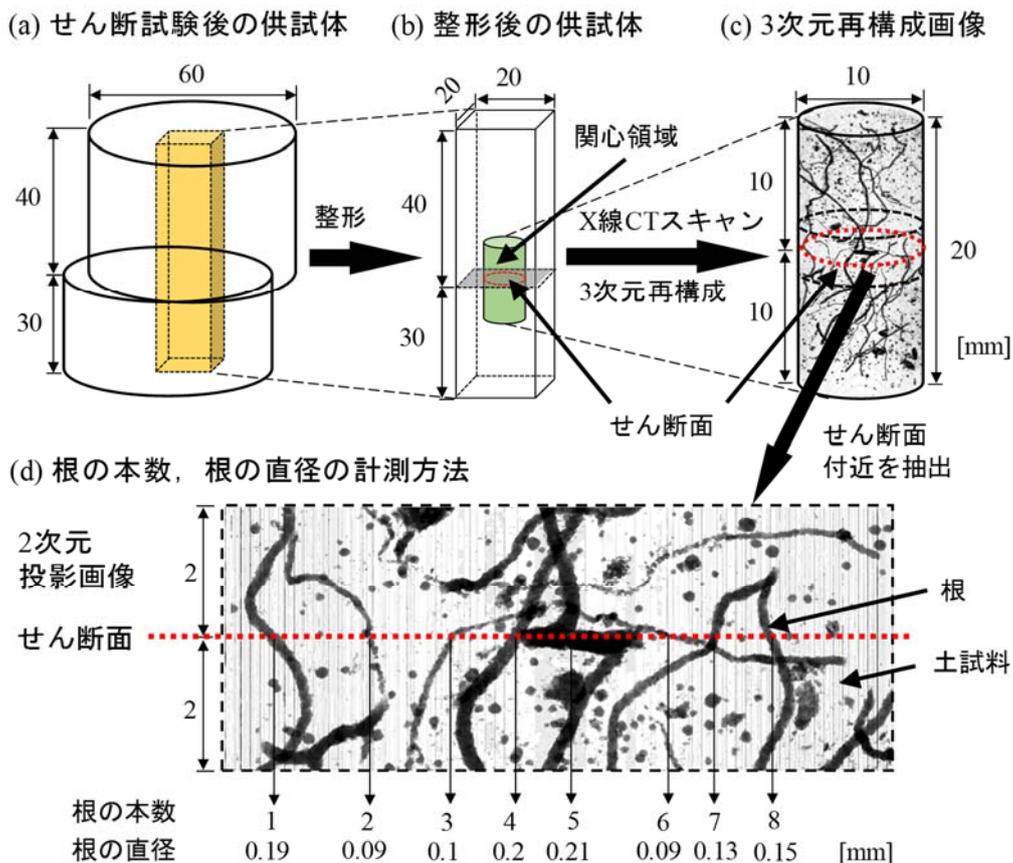


図5-3 X線CTスキャンの方法と、根の本数と直径の計測方法について示した概略図

して、せん断試験後の供試体を極力乱さないようにカッターナイフで四角柱に整形し、供試体サイズを小さくしたものに対して X 線 CT スキャンを行った (図 5-3(a), (b)参照)。

図 5-3(c)は X 線 CT スキャンで得られた断面画像を、解析ソフト (ExFact VR2.0¹¹⁾) で 3 次元再構成した例 (KBG4) を示したものである。なお、底面から 30 mm の位置をせん断面と考え、この面から上下 10 mm、直径 10 mm の円柱領域を関心領域として 3 次元再構成しており、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¹²⁾ 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¹³⁾ が行ったように解析ソフトで X 線吸収量を示す GL 値 (Gray Level) 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、この正規分布同士の間点を両者の閾値とした。

図 5-3(d)は実際に KBG4 で行った計測の例であり、計測に使用した図は先述の関心領域のうち、せん断面から上下 2 mm の領域を抽出し、3 次元再構成画像を供試体側面から (せん断方向と直角方向を正面として) 見た際の 2 次元投影画像である。せん断面 (図中の点線) を通過する根の本数は、この 2 次元投影画像から (奥行方向の交差などは考慮せずに) 目視でカウントした。また、直径についても根系と認識した黒色部分の幅を、画像サイズ (高さ 4 mm) を基準として、画像上から相対的に算出した。

図 5-4 は根系含有土供試体を用いた 3 ケースの内、X 線 CT スキャンにより得られた代表的な 3 次元再構成画像を比較したものである。なお、各ケースにおいて、 τ_{\max} は右側にある供試体 (供試体名に付された数字が大きい方) の方が大きい (図 5-1 参照)。各画像において、先述した方法で根系と判断した黒色部分を比較すると、生育期間が異なるケース 2 と 3 では生育期間が長いケース 3 の方が、せん断面 (図中の点線) 周辺にある根系の量が明らかに多いことがわかる。ただし、KBG1 の下半分に黒色部が多いことについては、撮影条件の不備もあるが、この領域内の密度差が小さいことが起因した現象であり、黒色部の形状から

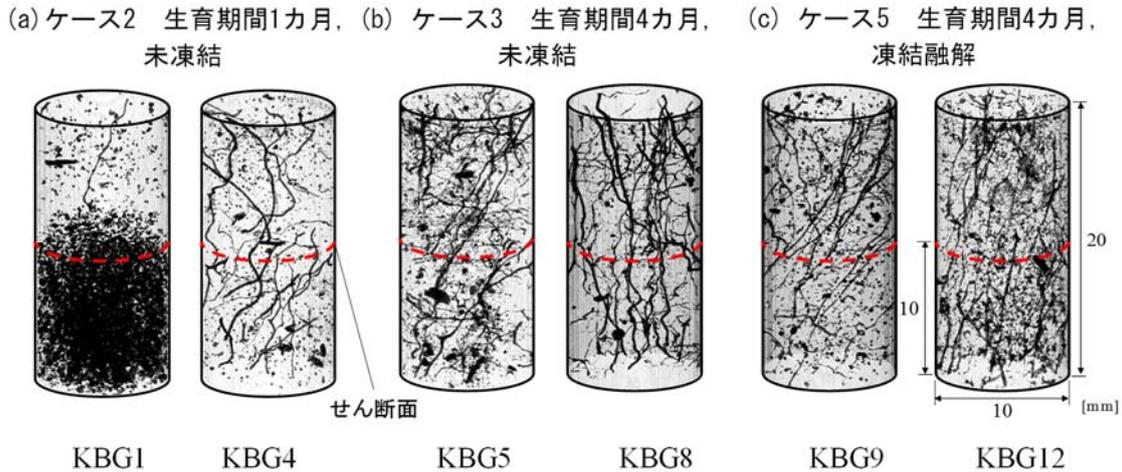


図 5-4 X線 CT スキャンによって得られた根系含有土供試体の 3次元再構成画像

考えても根系はほとんど存在していないと考えている。また、このことは KBG1 の τ_{\max} が土供試体と同程度であることと整合する。

さらに、同じケース内の 2 つの供試体を比較すると、ケース 2 と 3 では τ_{\max} の大きい方（右側）がせん断面周辺の根系量が多いように見える。一方、凍結融解履歴を与えたケース 5 に着目すると、過去の研究⁶⁾で観察された根系の切断といった損傷は確認できず、生育期間も同程度で凍結融解履歴を与えていないケース 3 とそれほど大きな違いは見られないことがわかる。

図 5-5 は各供試体の τ_{\max} と、先述した 2次元投影画像を用いて簡易的に測定した根の本数（図 5-5(a)）と根の直径から算出した断面積の合計（図 5-5(b)）との関係をプロットしたものである（図 5-3(d)参照）。なお、断面積は根の断面を円として概計した。対象とした領域は供試体内のごく一部であり、さらに 2次元に投影した画像から簡易的に読み取っているため、各供試体間におけるせん断面周辺の根の本数並びにその大小は決して正確ではないが、図 5-5(a)に示した根の本数でも図 5-2(b)に示した供試体から実際に採取して計量した根系乾燥質量と同様な相関関係が得られていることがわかる。さらに、少なからずせん断抵抗に影響を与えると考えられる根の太さも考慮することで、わずかであるが根の本数に対する相関よりも高くなっている (0.794→0.819)。また、図 5-2 に示した

発芽数や根系乾燥質量との関係でも見られたように、凍結融解履歴を与えたケース5は概ね他と同様な傾向にあり、耐寒性があるとされているケンタッキーブルーグラスについては、凍結融解履歴がせん断抵抗に与える影響はそれほど大きくないと考えられる。

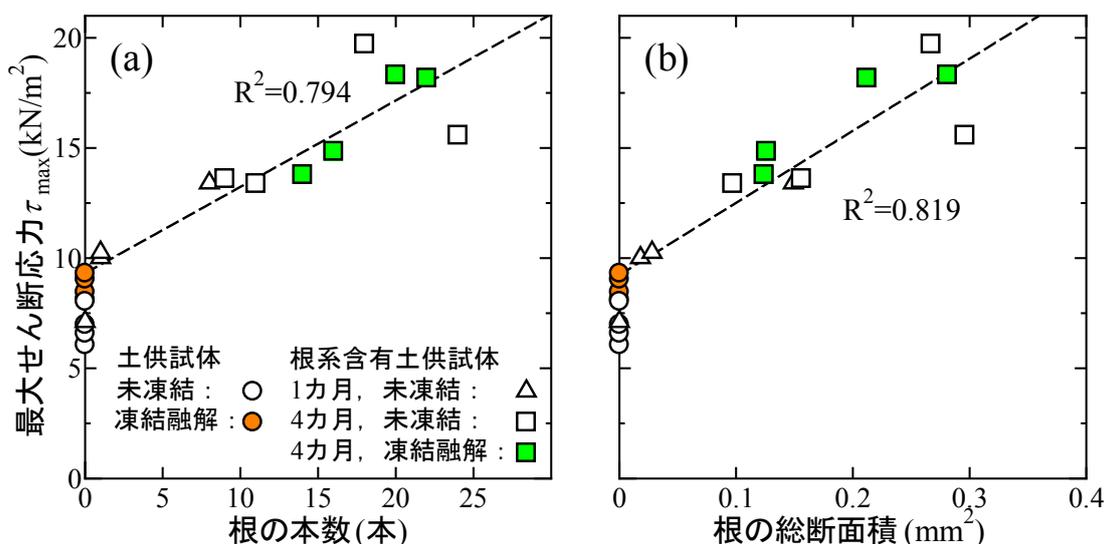


図 5-5 最大せん断応力 τ_{max} とせん断部における(a) 根の本数および (b) 根の面積

(2) ボイド解析で求めた根系の体積を用いたせん断強度の評価

さらに、本研究に用いた解析ソフト (ExFact VR) では、3次元再構成画像に対して「ボイド解析」を行うことで、空隙や各種の粒子を検出することができる。「ExFact VR ボイド解析オプション¹⁴⁾」では、3次元画像中に検出対象の候補となる無数の Seed Point を指定し、そこから近傍の画素に領域を拡張する「Region Growing」アルゴリズムを採用している。本研究では、ボイド解析で供試体内の根系を抽出し、せん断面付近の関心領域内にある根系の体積を定量的に把握することが試みた。

図 5-6 はボイド解析を用いた根系の抽出方法について示した概略図である。ここでも、せん断試験後の供試体から、カッターナイフで四角柱に整形し、供試体サイズを小さくしたもの3つ採取し、これに対して X 線 CT スキャンを行った (図 5-6(a), (b)参照)。解析は関心領域の全体、すなわちせん断面から上下 10 mm

の範囲に対して実施している (図 5-6(c))。図 5-6(d)には根系の抽出例も示しているが、色の違いは複雑な形状の根系を空隙と捉え、その体積を球体に置き換えた場合の直径 (有効直径) に対応している。なお、図 5-7 に全ての根系含有土供試体の 3 次元再構成画像を、図 5-8 にポイド解析によって抽出した根系の画像をまとめて示す。

図 5-9 は各供試体の τ_{\max} とポイド解析で得られた根系の体積 (3 つの関心領域を平均した根の体積) との関係プロットしたものである。根の体積と τ_{\max} との間に正の相関が認められ、供試体内に含まれる根系の体積がせん断抵抗に直接的な影響を与えていることが窺える。また、根系乾燥質量や根の総断面積と τ_{\max} の関係と比べても、同程度もしくは幾分高い相関関係を認めることができた。このことから、せん断面周辺に発達した根系がせん断応力に強く影響を与えていることが窺える。なお、解析から得られた根系体積においても、根系乾燥質量や根の本数、根の総断面積と同様な相関が得られており、供試体内 (特にせん断面

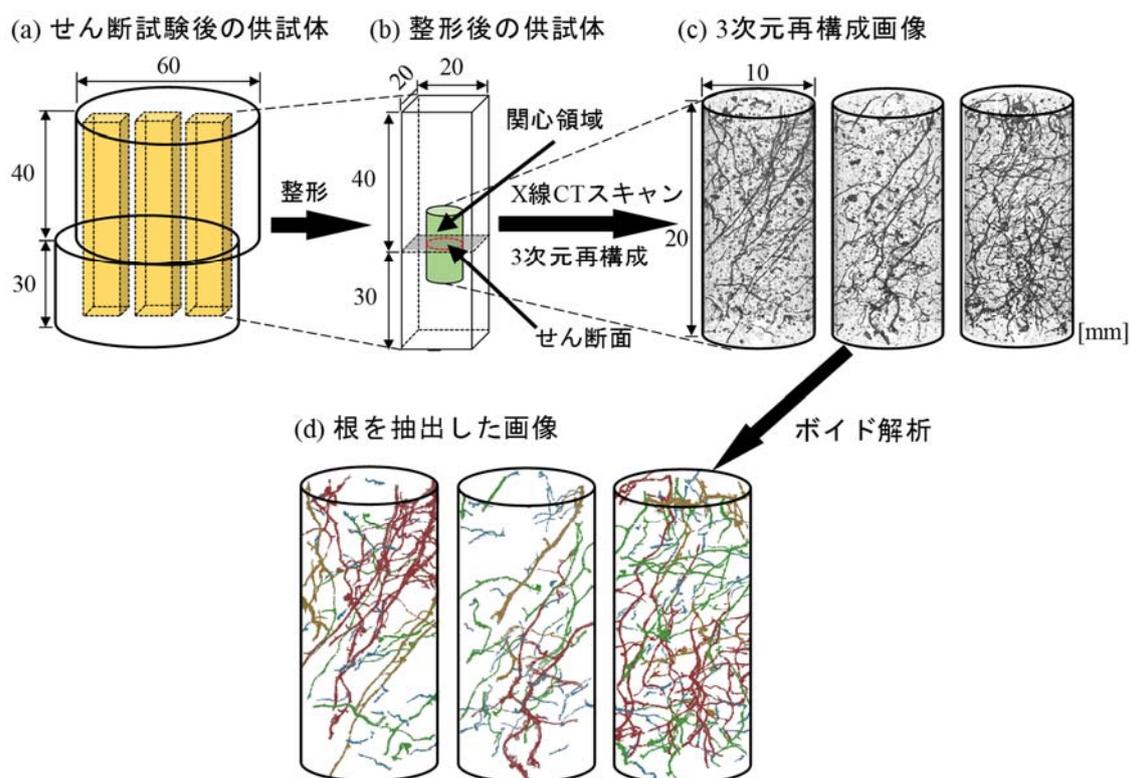


図 5-6 X線 CT スキャンの方法と、ポイド解析による根系の抽出方法について示した概略図

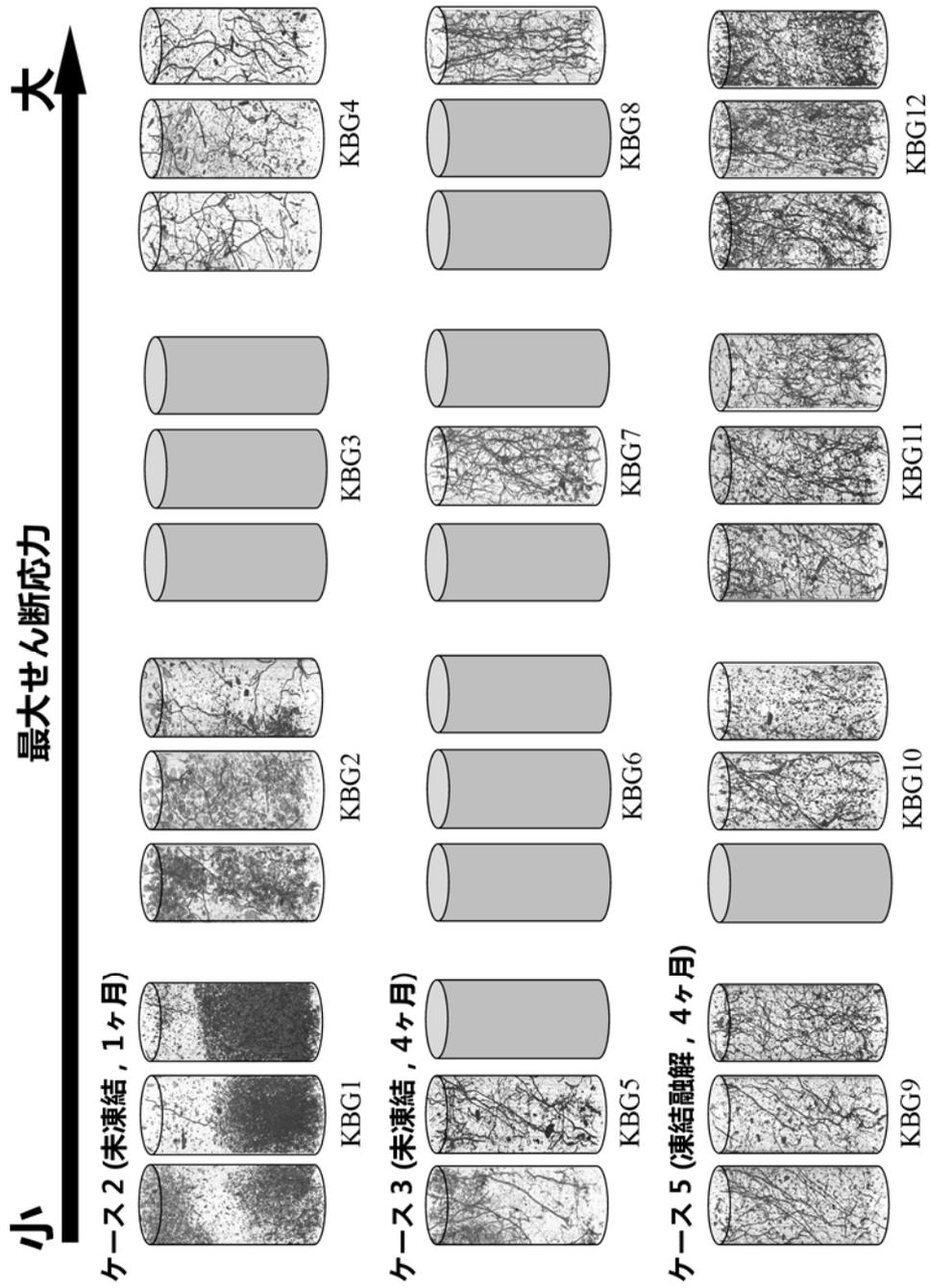


図 5-7 X線CT スキャンによって得られた根系含有土供試体の3次元再構成画像

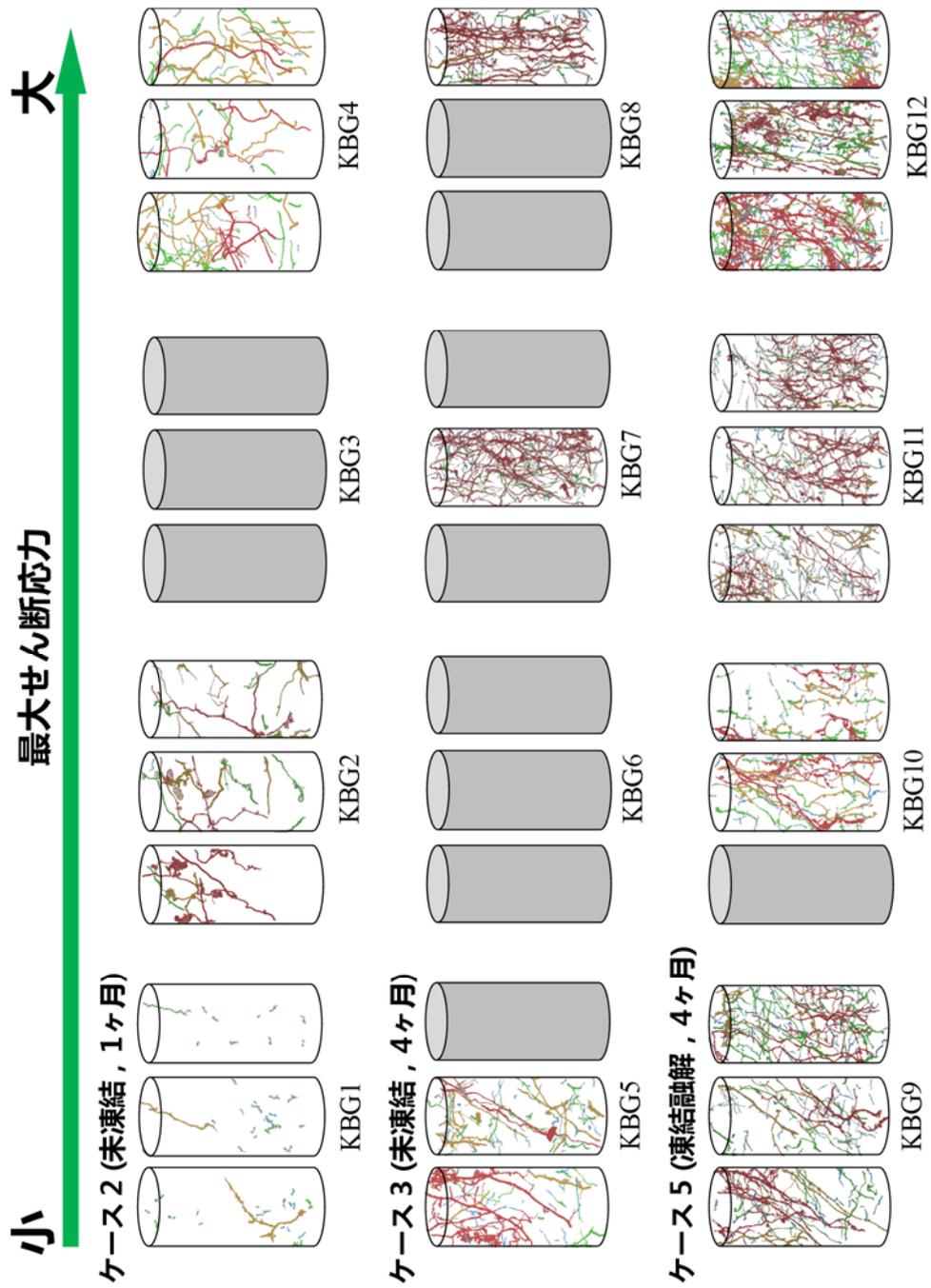


図 5-8 ボイド解析によって抽出した根系含有土供試体中に発達した根系の画像

5.3 まとめ

本研究では、植生工として寒冷地での採用実績も多いケンタッキーブルーグラスの根系が土供試体のせん断抵抗に与える影響を把握するため、X線CTスキャンを併用した低鉛直応力下での定圧一面せん断試験を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- 根系含有土供試体では、せん断変位が小さな領域では土供試体のせん断挙動とそれほど大きな違いは見られないものの、せん断変位が大きくなるにつれてせん断抵抗が大きくなることが明らかとなった。また、その傾向は生育期間が長いほど顕著であった。
- X線CTスキャンによる一面せん断試験後の供試体の3次元再構成画像から、せん断面周辺における根系の含有量とせん断抵抗の大きさには相関が認められた。
- 2次元投影画像を用いて簡易的に読み取った根の本数や総断面積であっても、実際に採取して計量した根系乾燥質量と同程度の相関関係を得ることができた。
- ボイド解析を用いて求めた根系の体積でも、根系乾燥質量や根の総断面積と同程度、もしくは幾分高い相関関係を得ることができた。
- X線CTスキャンは、土のせん断抵抗に及ぼす根系の影響を把握する手段の一つとして有用であることがわかった。

最後に、凍結融解履歴を与えた根系含有土供試体に対する定圧一面せん断試験により、耐寒性があるとされているケンタッキーブルーグラスについては、凍結融解履歴がせん断抵抗に与える影響はそれほど大きくないことが明らかとなった。

以上の研究成果については、緑化工学会誌(2018)¹⁵⁾において公表済みである。

第5章の参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針（平成21年度版），2009.
- 2) 山田 満充，山梨 高裕，佐藤 厚子：のり面緑化における種子配合の検討について，第57回（平成25年度）北海道開発局技術研究発表会，2014.
- 3) 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：2018年2月20日).
- 4) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 JGS 0172-2009 凍上性判定のための土の凍上試験方法，pp.230-234，2009.
- 5) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説 JGS 0561-2009 土の圧密定圧一面せん断試験方法，pp.675-676，2009.
- 6) 川内谷 勇真，宋 白楊，中村 大，川口 貴之，川尻 峻三，山下 聡：凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む細粒土のせん断特性に関する基礎的研究，日本緑化工学会誌，Vol.43，No.1，pp.144-149，2017.
- 7) 卷内 勝彦，峯岸 邦夫，星野 郁夫：短枝付き短繊維混合度の力学的補強効果，ジオシンセティクス論文集，Vol.17，pp.191-194，2002.
- 8) 佐々木 貴，川口 貴之，中村 大，山下 聡：凍結融解の有無が締固めた細粒土の一面せん断挙動に与える影響，地盤工学会北海道支部技術報告集，Vol.54，pp.69-74，2014.
- 9) 小橋 澄治：斜面安定に及ぼす根系の影響についての最近の知見，緑化工技術，Vol.10，No.1，pp.14-19，1983.
- 10) 宗岡 寿美，山崎 由理，小俣 悟得，石川 玲奈，福田 尚人，木村 賢人，辻 修：外来草本植物と地域性種苗の根系を含む土供試体のせん断特性と覆土厚との関係，日本緑化工学会誌，Vol.42，No.4，pp.494-502，2017.
- 11) 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，2017.
- 12) 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.

- 13) 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 スキャンによるベーンせん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.
- 14) 日本ビジュアルサイエンス株式会社 : ExFact VR ボイド解析オプション ユーザーズマニュアル, 2017.
- 15) 宋 白楊, 中村 大, 川口 貴之, 川尻 峻三, 山口 滉平, 山下 聡 : ケンタッキーブルーグラス(*Poa pratensis* L.)の根系が細粒土のせん断強度に与える影響, 日本緑化工学会誌, Vol.44, No.1, pp.15-20, 2018.

第 6 章 結 論

のり面保護工の一つである植生工は植物を繁茂させることでのり面の表層侵食を防ぐとともに、根系の侵入で表層地盤を拘束する工法である。このため、草本植物の根系が土のせん断強度に与える影響を把握することは重要であるが、根系を含む均質な土供試体を作製することや、実際ののり面表層で作用するような小さな土被り圧を用いて室内試験を実施することなど、試験方法上の解決しなければいけない課題も多い。また、供試体間で異なる根系の発達状況を加味して、試験結果を評価することが難しいことなどもあってか、それほど多くの研究例は存在しない。さらに、積雪寒冷地においては、凍結融解履歴が根系に与える影響や、それに伴うせん断強度の変化を把握することが重要であるが、これについて詳細に検討した事例は極めて少ない。

そこで、本研究では凍結融解作用が植生工に及ぼす影響を明らかにすることを最終目標として、表層崩壊が発生したのり面における現地調査や、X線CTスキャンを活用した凍上過程における土の内部観察、X線CTスキャンを併用した一面せん断試験を実施した。以上の研究により、植生工の補強効果を定量的に評価する手法を確立し、根系を含む細粒土のせん断特性を把握ができた。本研究で得られた知見について、各章ごとに以下に示す。

6.1 寒冷地で発生した極表層をすべり面とする斜面崩壊の調査

斜面崩壊が発生した道路のり面において現地調査（崩壊面の測量や簡易動的コーン貫入試験など）を実施し、崩壊地直近の未崩壊地から採取した不攪乱試料を用いて定圧一面せん断試験を行った。得られた知見について、以下にまとめる。

- 崩壊面から採取した不飽和状態の供試体は、飽和度が上昇することによって、内部摩擦角 ϕ が幾分増加し、粘着力 c が低下することがわかった。一方で、崩壊面以深から採取した不飽和状態の供試体では、 c は崩壊面から採取した供試体と概ね変わらないものの、 ϕ はのり面の勾配（45°）よりも明らかに大きいことが確認できた。
- 一面せん断試験から得られた強度定数を用いた安定解析から、飽和度が上昇することで、崩壊面以深の安全率が低下し1を下回ることが明らかとなった。また、この安全率の低下には、粘着力の低下が大きく関与していると解釈で

きた。このことから、ここで示した斜面崩壊の主たる要因は、降雨浸透によって生じた粘着力の低下であると考えられる。

- 崩壊深および根系の侵入深は概ね一致しており、安定解析においても、崩壊面以浅の安全率は飽和・不飽和に関わらず1を上回る結果となった。根系の侵入深以浅で斜面崩壊が発生する可能性が極めて低いことがわかった。以上のことから、斜面表層地盤は根系によって増強されていることが推察できた。

6.2 X線CTスキャンを活用した凍上過程における土の内部観察

X線CTスキャン装置内で土を一次元凍結させることができる凍上実験装置を開発し、凍上過程における土の内部の様子を、X線CTスキャンで観察することに取り組んだ。この内部観察により、土中にアイスレンズが形成されていく過程や、アイスレンズそのものの形状などを詳細に観察することが可能となった。また、X線CTスキャン画像から得られるGL値の変化を捉えることで、アイスレンズ生成に伴う土の密度変化についても把握することができた。得られた知見についてについて、以下にまとめる。

- 凍上性の高い風化火山灰では、実験の初期段階において、複数のクラック状のアイスレンズが発生していることが観察できた。また、凍結線が停滞し、熱のバランスが取れた状態では、厚く発達したアイスレンズを観察することができた。礫分を含まない風化火山灰では比較的フラットな形状のアイスレンズが形成されていくことが観察された。
- 礫分を含む段丘堆積物ではアイスレンズが大きな粒子の周りから形成されていく様子が観察できた。また、形成されたアイスレンズは風化火山灰に比べて凹凸のある形状であった。
- 凍上性を示さない粗粒分で構成された火山灰質砂では凍上は発生せず、アイスレンズも観察されなかった。
- 凍上性を有する風化火山灰と段丘堆積物では、凍結部分のGL値が低下していることがわかった。これは土中にアイスレンズが析出することによって土粒子が押し広げられ、相対的に密度が低下するためだと考えられる。

以上の研究結果から、凍上現象が土に与える影響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明らかとなった。

6.3 凍結融解履歴を受けた植物根系を含む細粒土のせん断特性に関する基礎的研究

凍結融解履歴を受けた草本植物の根系を含む土供試体のせん断特性を把握しうる試験方法を確立するため、その足掛かりとして生育の速さや観察の容易さ等を考慮し、コマツナの根系を含む土供試体の一面せん断試験や X 線 CT スキャンによる観察を行った。得られた知見についてについて、以下にまとめる。

- 未凍結状態の供試体では、低鉛直応力下でのみ根系による増強効果が確認され、根系を含まない土供試体に比べて、せん断強度がわずかに増加することがわかった。また、X 線 CT スキャン画像から、根系が切断されずにせん断に抵抗している様子が窺えた。
- 凍結融解履歴を受けた供試体では、根系による増強効果は発揮されず、せん断強度に違いは見られなかった。また、X 線 CT スキャン画像から、凍結融解によって根系が損傷し、せん断に抵抗できないことが窺えた。
- 本研究で用いた植物（コマツナ）では凍結融解によって根系による増強効果が失われたのではないかと推察される。このことから、植生工に採用する植物によっては、凍結融解後に、根系による増強効果が期待できないことが明らかとなった。

この研究で実施した一連の試験方法によって、凍結融解履歴を受けた根系を含む土のせん断特性に関する定量的な評価や、根系に及ぼす凍結融解作用に関する定性的な評価がある程度可能となった。

6.4 ケンタッキーブルーグラスの根系が細粒土のせん断強度に与える影響

植生工として寒冷地での採用実績も多いケンタッキーブルーグラスの根系が土供試体のせん断抵抗に与える影響を把握するため、X 線 CT スキャンを併用した低鉛直応力下での定圧一面せん断試験を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- 根系を含む土供試体では、せん断変位が小さな領域では土供試体のせん断挙動とそれほど大きな違いは見られないものの、せん断変位が大きくなるにつ

れてせん断抵抗が大きくなることが明らかとなった。また、その傾向は生育期間が長いほど顕著であった。

- X線CTスキャンによる一面せん断試験後の供試体の3次元再構成画像から、せん断面周辺における根系の含有量とせん断抵抗の大きさには相関が認められた。
- 2次元投影画像を用いて簡易的に読み取った根の本数や総断面積であっても、実際に採取して計量した根系乾燥質量と同程度の相関関係を得ることができた。
- ボイド解析を用いて求めた根の体積でも、根系乾燥質量や根の総断面積と同程度、もしくは幾分高い相関関係を得ることができた。
- X線CTスキャンは、土のせん断抵抗に及ぼす根系の影響を把握する手段の一つとして有用であることがわかった。

最後に、凍結融解履歴を与えた根系を含む土供試体に対する定圧一面せん断試験により、耐寒性があるとされているケンタッキーブルグラスについては、凍結融解履歴がせん断抵抗に与える影響はそれほど大きくないことが明らかとなった。

謝 辞

本論文は北見工業大学において研究生の半年と博士後期課程の三年半の計四年間に行ってきた研究成果を取りまとめたものです。

本研究を進めるにあたり、北見工業大学・地球環境工学科・中村 大准教授と川口貴之准教授には、実験の設計から論文の書き方に至るまで、様々な部分に関してご指導いただきました。また、先生から、研究者として必要な資質を学ぶことができ、本当に勉強になりました。今後は、これまでご指導いただいたことを胸に日々精進していこうと思います。

本論文に関して、多くの貴重なご意見をいただいた本論文の審査委員である北見工業大学地球環境工学科 山下 聡教授、井上真澄准教授、同大学地域未来デザイン工学科 富山和也准教授に心より厚く感謝の意を表します。

北見工業大学 寒地岩盤工学研究室、凍土・土質研究室の皆様が、いつも熱心に日本語や日本の文化などを教えてくれたり、実験を手伝ってくれたりしたことに、心から感謝します。また、研究室の皆さんと一緒に焼肉や飲み会をして、日本での留学生活は本当に充実したものとなりました。特に、宮川郁郎さん（現北海道旭川建設管理部）、三鍋佑季さん（現 北海道電力）、川俣さくらさん（現東京インキ株式会社）、川内谷勇真さん（現 JR 東日本コンサルタンツ株式会社）、在学中の岸川鉄啓さん、大谷 匠さん、小笠原明信さん、山口滉平さんには、生活や学習等で大変お世話になりました。

四年前、私は中国河南理工大学で修士課程を修了し、指導教員の芮大虎先生の推薦を受けて、日本に留学しました。留学の夢を叶える機会を与えてくれた芮先生には、本当に感謝しています。私は北見工業大学で博士号を取得し、今、大きな収穫を持って国へ戻ります。外国にいる数年間で、祖国の意味を感じることができました。

留学した四年間、家族と過ごす時間はほとんどありませんでしたが、家族はいつも応援や励ましの言葉をかけ続けてくれて、ずっと私のそばに寄り添ってくれているようでした。家族からの全面的な支援・協力を受けて、家族の価値を再確認することができました。今後も家族を大切にしていきたいと思います。

博士課程を勉強する過程は、絶え間ない自己否定と自己再構築の過程であると言う人もいますし、博士課程を勉強することは人生の孤独な修行であると言う人もいます。この過程が私に教えてくれたのは、不安や苦難にどう向き合うかということです。

日本での四年間の留学は、私の人生で最も心に残る貴重な経験になりました。海外での四年間の留学で、感謝の気持ちを学ぶことができました。帰国後に母国と日本の懸け橋として大きく羽ばたき、両国の技術交流を促進するため、今から精いっぱい努力をして頑張っていきたいです。