

7. 樽前降下火砕堆積物の物理力学特性と気候変動を考慮した厚真川流域にある火山灰斜面の地盤災害リスク評価

Geotechnical properties of Tarumae pyroclastic fall deposits and risk evaluation on geotechnical disaster of natural slopes considering climate changes

川村 志麻¹
Shima KAWAMURA

¹ 室蘭工業大学 大学院工学研究科 教授

要 旨

平成30年9月北海道胆振東部地震によって厚真川流域では大規模な斜面崩壊が発生し、これによる土砂が流域内の斜面や氾濫原、河道内に大量に堆積している。この土砂は今後の融雪出水や夏期出水で厚真川およびその支川を通じて徐々に、もしくは一気に河道域、氾濫域、河口域さらには海域への輸送・堆積・拡散が予想される。大量の土砂流出は、住民や農地への直接的・壊滅的な被害は勿論、流域や河川の水環境、生物環境、生態系、さらには海域の漁業環境にも対する影響は計り知れないものがある。この現象は、近年の地球温暖化による降雨の激甚化により加速的に顕著化する懸念もあり、早急な土砂の実態調査、モニタリング（気象・水文・水理・土砂・環境）、想定される現象や影響・被害の予測、対策の検討が必要である。特に、雪解け出水時期を控え、早急な調査体制の確立と調査の開始が必要である。

本研究では、上記の目的を達成するために、厚真川流域に分布する地盤材料の物性を調査し、その情報に基づいた斜面の地盤災害リスクを評価している。具体的には、厚真町の日高幌内川を支川に持つ厚真川流域に広く分布する、樽前降下火砕堆積物（*Ta-d*）を対象に、その物理・力学特性・粒子破碎特性を明らかにしている。次いで、北海道のような積雪寒冷気候下にある斜面の安定性を議論する上では、重要となる凍結融解履歴が土質の物性に与える影響を定量的に評価している。最後に、将来気候における降水量の増加に伴う地下水位の変動を調べ、凍結融解による地盤物性の変化と地下水位の変動を考慮した斜面の安定解析（極限安定解析）を行うことによって、この流域にある火山灰斜面の地盤災害リスクの評価を行い、今後の土砂流動の推定のための基礎資料を提供している。

《キーワード：降下火砕堆積物；物理力学特性；気候変動；斜面災害リスク》

7. 1. はじめに

2018年9月6日03時07分、北海道勇払郡厚真町を震源とするM6.7の地震¹⁾が発生した。この地震では、厚真町で震度7、安平町とむかわ町で震度6強を観測し、北海道中部地方の一部で震度6弱を記録した。気象庁は、この地震を「平成30年北海道胆振東部地震」と命名している。この地震により、死者43人、軽傷者734人、住家全壊469棟、住家半壊1660棟などの甚大な被害²⁾が生じた。厚真町周辺では広範な土砂崩壊が同時多発的に発生し、樽前山、恵庭岳、支笏カルデラを噴出源とする「降下軽石火砕堆積物」によって形成された自然斜面がこの大惨事誘発の元凶になった。特に、樽前山を噴出源とする降下火砕堆積物からなる地層において斜面災害が多発した³⁾。本研究では、厚真川流域に広く分布する樽前降下火砕堆積物の物理・力学特性・粒子破碎性を明らかにした^{4),5)}。その後、将来気候における降水量の増加に伴う地下水位の変動を明らかにし、凍結融解と地下水位の影響を考慮した極限安定解析を行うことによって、この流域にある火山灰斜面の地盤災害リスクを評価した。

7. 2. 樽前降下火砕堆積物の概要

7. 2. 1. 試料の概要と採取地点

調査地点の概略図を図7-1に示す。震源地となった北海道胆振東部地域では、樽前山および恵庭岳と支笏カルデラを噴出源とする火山灰質土が広く分布している⁶⁾。支笏カルデラの降下テフラは約4万年前、恵庭岳の降下テフラは約2万年前、樽前山の降下テフラは約300～9000年前に堆積したとされている⁷⁾。今回対象にした試料は、樽前山を噴出源とした300～9000年前の降下火砕堆積物 (*Ta*) である。この降下火砕堆積物 (*Ta*) は、樽前山より東の方角に降灰の基軸を持ち、*Ta-a*から*Ta-d*までの4ユニットに分かれている^{6),7)}。それらは、いずれも粗粒な軽石により構成されており、乾燥密度は低い。自然含水比は*Ta-a*、*Ta-b*と*Ta-c*は10%～40%であり、*Ta-d*は140%～210%と非常に高い値⁷⁾を示す。同様に、*Ta-a*、*Ta-b*と*Ta-c*の間隙比は1.0～2.0であるのに対し、*Ta-d*の間隙比は3.0～8.0⁶⁾と幅広い値を示すことも特徴である。本研究では、日高幌内川流域の大規模岩盤すべりによって河道閉塞が生じた崩壊地の露頭から*Ta-d*層の土試料を採取した。また東和川流域においても同様に崩壊地の露頭から*Ta-d*を採取している。いずれも表層から2m以浅である。図7-2に試料を採取した日高幌内川流域と東和川流域の2地点を示す。

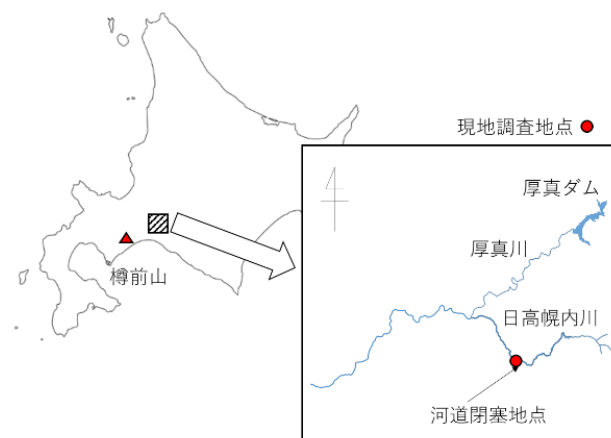


図7-1 調査地点の概略



図7-2 試料採取した地点（国土地理院地図に加筆）

7.2.2. 樽前降下火砕堆積物 (Ta-d) の物理・力学特性と工学的評価

a) 物理力学特性

行った試験は土粒子の密度試験，粒度試験，液性・塑性限界試験，強熱減量試験である．試験方法はそれぞれ地盤工学会基準に従っている．採取試料の試験結果を図7-3と表7-1に示す．粒径加積曲線の比較では，東和川流域のTa-dの粒度分布は日高幌内川流域のTa-dのものに対して左側にシフトしており，細粒化が進んでいることがわかる．例えば，平均粒径 D_{50} は日高幌内川のTa-dは4.1 mm，東和川のは2.2 mmとなっている．液性限界・塑性限界試験結果では，日高幌内川流域の試料において液性限界は93.9%を示すものの，塑性限界は両試料ともN.P.の判定となっている．また，強熱減量試験結果の比較では，日高幌内川のTa-dでは5.9%であるのに対し，東和川のTa-dでは15.5%と約3倍の値を示している．北海道内の火山灰質粗粒土の強熱減量の平均的な値はおおよそ10%程度以下を示すことが報告⁶⁾されており，東和川のTa-dはそれらよりも大きな値を示している．この指標に基づけば，厚真町周辺に分布する火山灰質粗粒土は，堆積場所の相違によって風化の進行の程度が異なっていることが示唆される．

b) 静的力学特性及び圧密特性と粒子破碎特性

上述のように，各調査地点において風化度の違いが現れていること，またそれが斜面崩壊現象に影響を及ぼすことが考えられることから，ここでは，風化現象を土粒子の細粒化として単純に捉え，静的三軸圧縮試験と圧密試験から，本試料であるTa-dの基本的な力学挙動と細粒化（粒子破碎）の発生の仕方について検討を加えた．なお，東和川流域の土試料に対しては，標準圧密試験⁴⁾のみを実施している．

実施した試験は，圧密排水三軸試験（CD）と圧密非排水三軸圧縮試験（CUB試験）である．日高幌内川流域のTa-dの試料を用いている．各供試体（直径70mm，高さ170mm）は，多重ふるい落下法（MSP法）により作製されており，CDおよびCUB試験の圧密後の相対密度 D_{rc} は104~118%となった．なお，相対密度は，砂の最大・最小乾燥密度試験により求め，三軸試験に用いた試料粒径を用いて算出している．それぞれ $\rho_{dmax}=0.472 \text{ g/cm}^3$ ， $\rho_{dmin}=0.269 \text{ g/cm}^3$ である．なお，シンウォールサンプリング時の原位置の乾燥密度は 0.440 g/cm^3 であった．試験での有効拘束圧は $\sigma'_c=49 \text{ kN/m}^2$ ， 98 kN/m^2 ， 196 kN/m^2 であり，間隙圧係数 B 値は0.96以上，せん断速度は $0.25\%/min$ である．各供試体の飽和化には二酸化炭素法を用いた．

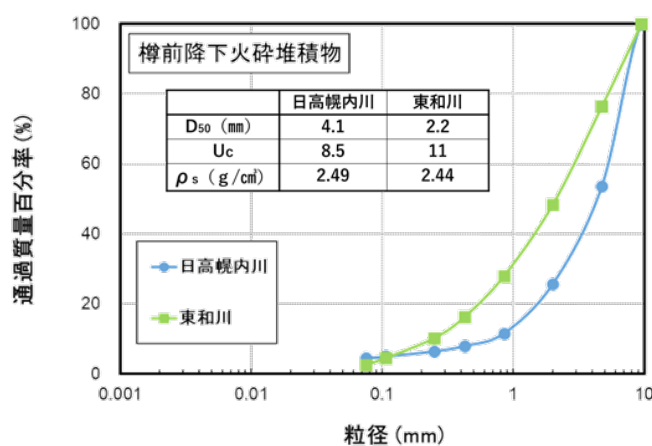


表7-1 各地点のTa-dの物理試験結果

流域名	液性限界(%)	塑性限界(%)	強熱減量(%)
日高幌内川	93.9	N.P.	5.88
東和川	N.P.	N.P.	15.5

図7-3 地点におけるTa-dの粒径加積曲線

図7-4は、圧密非排水三軸試験（CUB）、圧密排水三軸試験（CD）結果から得られた最大、最小主応力比（ $=\sigma'_1/\sigma'_3$ ）と最大、最小主ひずみ（ $=\varepsilon_1, \varepsilon_3$ ）の関係を示したものである。比較のため、森火山灰質土と富川火山灰質土と中標津火山灰質土の試験結果を併記している。森火山灰質土は駒ヶ岳を噴出源とし、富川火山灰質土は支笏を噴出源とし、中標津火山灰質土は摩周を噴出源とした北海道内の火山灰質土である。特に、摩周を噴出源とする中標津火山灰質土は、茶褐色で粗粒な土粒子を持つ火山灰質土であり、その粒子の脆弱性は、今回の試料と非常によく似ている。なお、これらの火山灰質土の力学特性については既報に詳しい⁸⁾。はじめにCUB試験結果について述べる。図より、強度-変形特性は密な砂が示す硬化-軟化型の挙動と類似していることがわかる。また、各試料の相互の正確な比較はできないものの、樽前火山灰質土（Ta-d）の主応力比は富川火山灰質土や中標津火山灰質土の値よりも低く、森火山灰質土より高い値を示している。有効拘束圧 σ'_c の増加に伴って同じひずみレベルでの応力比が低下しており、拘束圧依存性を示している。一方、CD試験結果では、樽前火山灰質土の主応力比は森火山灰質土や富川火山灰質土の値よりも低く、中標津火山灰質土のそれに類似の傾向を示していることがわかる。このような排水条件による力学挙動の変化は、後述する破壊時の平均有効主応力 p'_f の違いに起因する粒子破砕量に起因して生じたものであろう。結果として、せん断強度パラメータは、それぞれ $c'=8\text{kN/m}^2$ と $\phi'=42.5\text{ deg.}$ 、 $c_d=33.0\text{ kN/m}^2$ と $\phi'=29.0\text{ deg.}$ になった。なお、ダイレイタンシー特性ならびに間隙水圧挙動においても負のダイレイタンシー域で破壊に至っていることが明らかにされている⁹⁾。

このように、この周辺に分布するTa-dは、有効拘束圧依存性の強い土質材料であることが明らかにさ

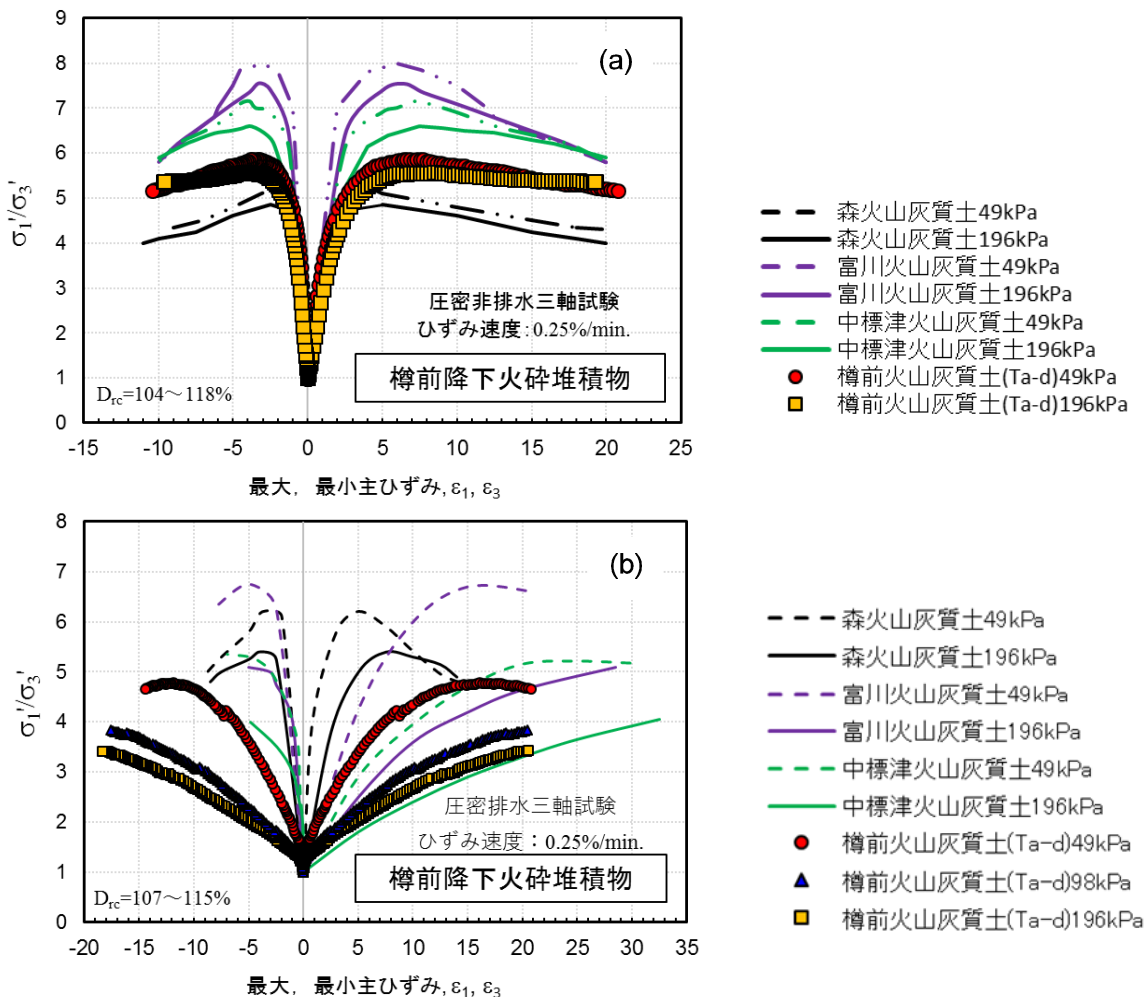


図7-4 静的三軸試験から得られた応力-ひずみ関係：(a) CUB試験，(b) CD試験

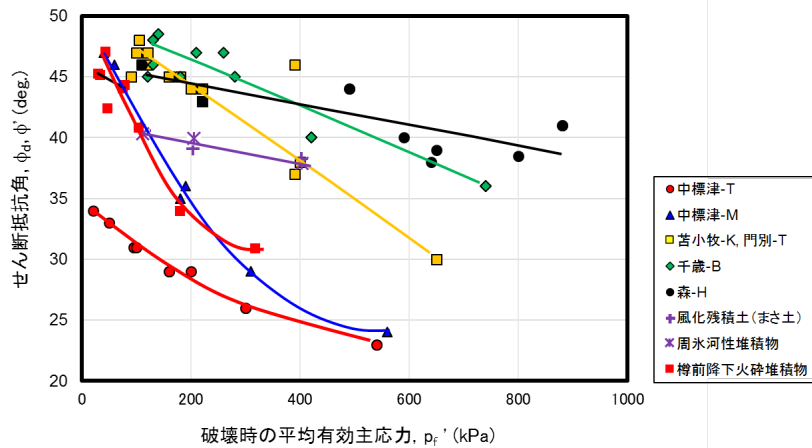


図7-5 せん断抵抗角と破壊時の平均主応力の関係

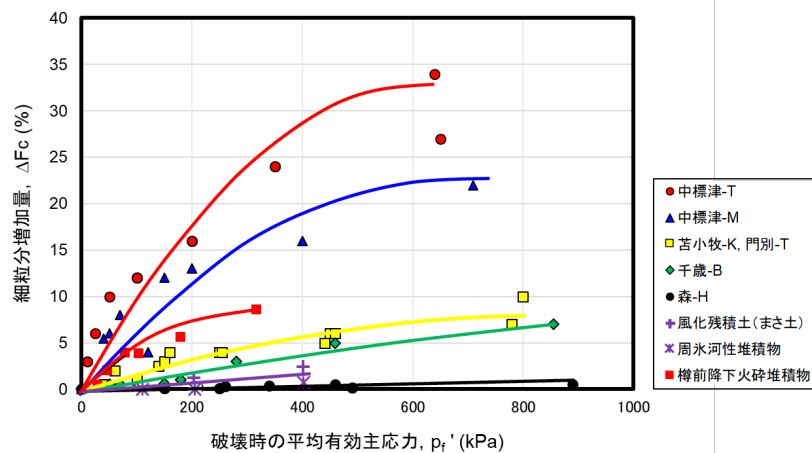


図7-6 細粒分増加量と破壊時の平均主応力の関係

れた。三浦ら^{8), 9)}は、有効拘束圧依存性の強い火山灰質粗粒土の強度特性の変化は、細粒分増加量 ΔFc を用いて工学的に評価できることを示している。本研究においても細粒分増加量との強度パラメータの関係について整理を行った。図7-5は、既往の報告¹⁰⁾にある、北海道内の主な火山灰質粗粒土とまさ土の粒子破碎特性と強度（せん断抵抗角）の変化について整理したものである。三軸圧縮試験におけるせん断抵抗角と破壊時の平均有効主応力 ($p_f' = (\sigma_1' + 2\sigma_3') / 3$) との関係で示している。なお、表7-1に示すように、本試料は液性・塑性限界試験結果から非塑性 (N.P.) になっていることから、ここでは $c'=0$ として各有効拘束圧の下でせん断抵抗角 ϕ' を算出した。図より、樽前降下火砕堆積物Ta-dは、支笏カルデラを噴出源とする苫小牧-K（柏原火山灰質土）および門別-T（富川火山灰質土参照）のものと同勾配の強度低下を示しており、その低下傾向が著しいことがわかる。

同様に、細粒分増加量 ΔFc と平均有効主応力 p_f' の関係を確認すると（図7-6参照）、Ta-dは、苫小牧-K、門別-Tと中標津-T（当幌火山灰質土）とのおおよそ中間程度の破碎性を示すことがわかる。このことは、図7-5に示す強度低下は粒子破碎に強く依存することを示している。

以上のように、樽前降下火砕堆積物は、基本的に粒子破碎の卓越する土質材料であり、その強度論あるいは斜面の安定性を議論する上では、風化の程度、すなわち、物理・化学的風化の程度を把握する必要があることが明らかにされた。

7.3. 厚真川流域にある火山灰斜面の地盤災害リスク評価

ここでは、将来気候における降雨水量の増加に伴う地下水位の変動を明らかにし、凍結融解と地下水位の影響を考慮した極限安定解析を行うことによって、厚真川流域にある火山灰斜面の地盤災害リスクを評価した¹¹⁾。また、将来気候変動予測データには、IPCC第5次報告書（以下、IPCC AR5と称す）に対応したデータセットを使用した。IPCC AR5のRCP（代表濃度経路）シナリオには、RCP2.6、4.5、6.0、8.5と4つのシナリオが用意されており、数値が大きくなるほど2100年時点での放射強制力が大きく、気象項目への影響も大きい¹²⁾。本研究では、RCP8.5に基づく1km格子の気候変動予測データを厚真川地域の評価に使用した。

7.3.1. 対象地域

対象地域とした厚真川流域は、厚真町から苫小牧東港区近辺を流れる、流域面積382.9km²、延長52.3kmの二級河川厚真川の流域である。厚真川流域の概略図を図7-7に示す。厚真川流域は樽前山および恵庭岳を噴出源とする降下火山堆積物が広く分布する地域である。前述のように、樽前火砕堆積物（*Ta-d*）のような火山灰質粗粒土は、粒子破碎による力学的劣化が指摘されており^{例えは8)}、ここでは、凍結融解によって生じる力学的劣化、すなわちせん断抵抗角の変化を考慮した解析を行った。

7.3.2. 使用データ

本研究では、気象庁のMRI-NHRCM20（気候変動予測モデル）¹³⁾の20km格子気象データを、上田ら¹⁴⁾が北海道全域を対象に1km格子毎に統計的ダウンスケーリングした高解像度のデータセット（以下、1km格子NHRCM20と称す）を使用した。このデータセットはDSJRA-55（領域ダウンスケーリングモデル）¹⁵⁾および気象庁平年値¹⁶⁾を用いてバイアス補正し、ダウンスケーリングしたものである。また、予測シナリオは地球温暖化への対策を一切行わなかった場合の最悪のシナリオであるRCP8.5シナリオについて、海面水温SST1～SST3の中で最も海面水温の高くなるSST3を採用し、現在気候との最も大きい変化量を評価する。対象期間は現在気候（1984年9月～2004年8月）、将来気候（2080年9月～2100年8月）とする。表7-2にNHRCM20および1km格子NHRCM20の概要を示す。

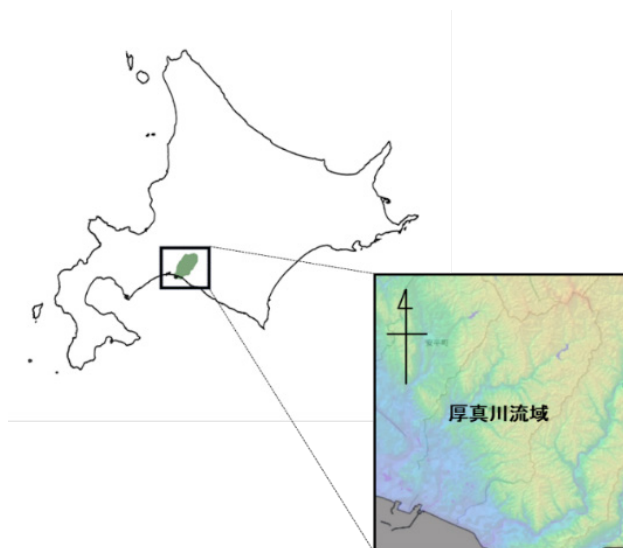


図7-7 厚真川流域の概略図

表7-2 NHRCM20の概略

MRI-NHRCM20→1km格子NHRCM20		
	現在気候	将来気候
空間解像度	20km→1km	20km→1km
対象期間	1984.9～2004.8	2080.9～2100.8
対象予測シナリオ		RCP8.5
海面水温パターン	HadISST	SST3
積雲対流スキーム	Yoshimura Scheme(YS)	Yoshimura Scheme(YS)
気象項目	気温、降水量、降雪水量	

7.3.3. 凍結融解による地盤物性の影響評価

樽前降下火砕堆積物 (Ta-d) を対象試料に、簡易的に凍結融解を与えた定圧一面せん断試験 (不飽和状態) を行い、力学特性への影響を評価する。本試験では垂直応力 $\sigma_v=49\text{kPa}$ とし、地盤工学会基準に従い試験を行った。凍結融解履歴の与え方は次の通りである。はじめに、せん断箱ごと供試体を水中に12時間水浸させ、1時間の水抜きを行い、不飽和状態を再現する (おおよそ自然含水比と同程度)。その後、 -20°C 以下でせん断箱ごと12時間凍結させ、常温で12時間融解させた。このサイクルを凍結融解履歴1回として、凍結融解回数1回と3回の履歴を与えた条件でせん断試験を行った。

7.3.4. 直列4段タンクモデルによる地下水位の推定

1km格子NHRCM20の現在気候と将来気候の各20年平均年間降雨水量が最大値となる年の夏季の降雨水量を入力値とし、直列4段タンクモデルによる解析後の各タンクの水位の和を地下水位 h として推定する。タンクモデルにはCommonMP (Common Modeling Platform for water-material circulation analysis) の要素モデル^{(17),(18)}を使用した (図7-8)。表7-3にタンクモデルの各パラメータを示す。

7.3.5. 実験・解析結果と地盤災害リスク評価

a) 定圧一面せん断試験結果

表7-4に凍結融解 N_c とせん断抵抗角 ϕ_d の関係を示す。せん断抵抗角の低減率 α は凍結融解0回のせん断抵抗角 ϕ_{d0} を基準とし、最小値となる凍結融解3回のせん断抵抗角 ϕ_{d3} との比率より、低減率 α を算出している。さらに現地の情報として最も確からしい値、ここでは、圧密非排水三軸試験 (CUB) 結果のせん断抵抗角 $\phi'_{d0}=42.5\text{deg}$ を低減率 α に乗じた $\phi'_{d3}=33.9\text{deg}$ を用いて斜面崩壊のリスク評価を行った。

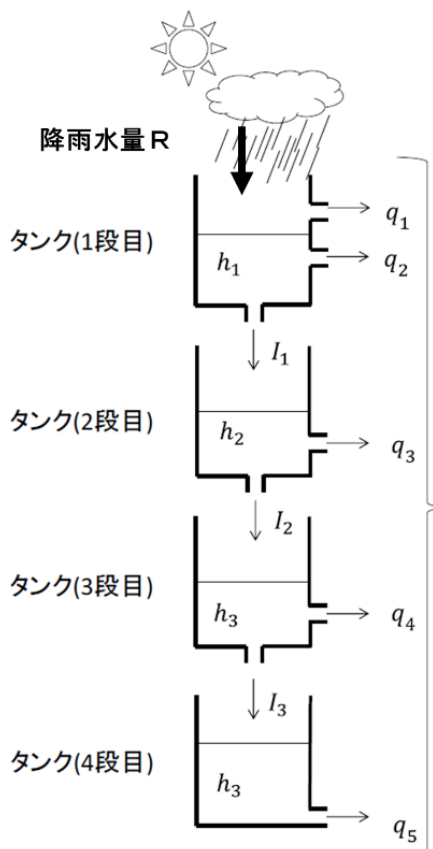


図7-8 厚真川流域の概略図

表7-3 タンクモデルのパラメータ

流出係数 q (h)	浸透係数 I (h)	流出孔の高さ L (mm)	初期水深 h_0 (mm)
$q_1=0.0125$		$L_1=40$	$h_{01}=0.001$
$q_2=0.004166$	$I_1=0.00833$	$L_2=15$	
$q_3=0.004166$	$I_2=0.004166$	$L_3=10$	$h_{02}=0.001$
$q_4=0.00125$	$I_3=0.00125$	$L_4=5$	$h_{03}=0.001$
$q_5=0.000125$		$L_5=0$	$h_{04}=0.001$

表7-4 NHRCM20の概略

凍結融解回数 N_c	定圧一面せん断試験 (不飽和状態)			CU試験
	0	1	3	
せん断強さ τ_f (kPa)	65.3	46.1	44.7	0
せん断抵抗角 ϕ_d (deg)	53.1	43.2	42.4	42.5

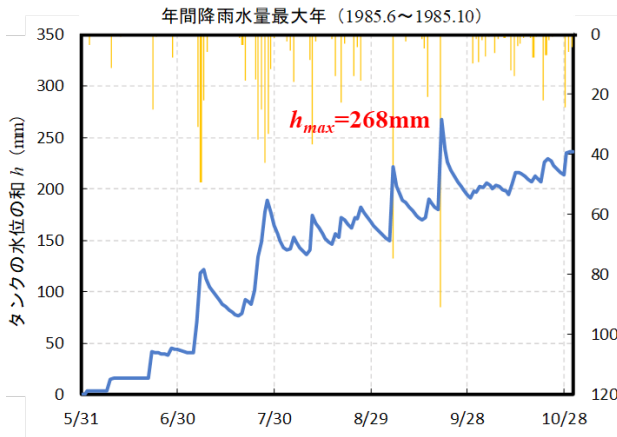


図7-9 現在気候最大降雨年のタンクモデル解析結果

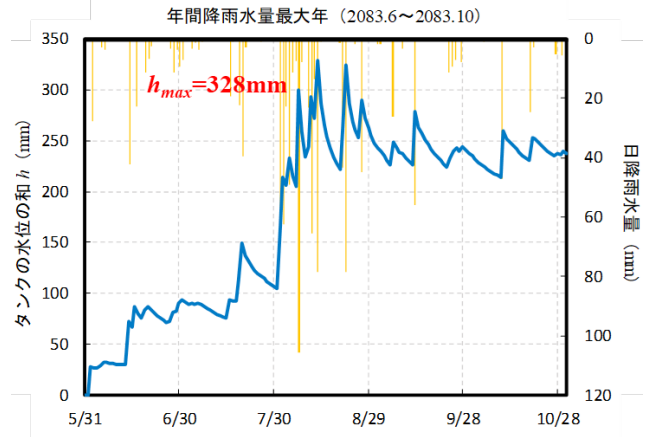


図7-10 将来気候最大降雨年のタンクモデル解析結果

b) タンクモデルによる解析結果

各気候20年間平均年間降雨量が最大となる年（現在気候1985.6～1985.10，将来気候2083.6～2083.10）を入力値とし，得られた解析結果を図7-9と図7-10に示す．日降雨量の最大値について着目すると，現在気候で90mm程度，将来気候では，110mm程度となり，その差は20mm程である．また，タンクの水位の和hについては，現在気候で268mm，将来気候では328mm程度でその差は60mmとなり，日降雨量の変化よりもタンクの水位の和hが大きく変動していることが確認できる．これは，将来気候の8月上旬において連続的な大雨が発生し，タンクの水位の和hが急激に増加し，水位が下がりきらないためと考えられる．次に，それぞれの気候におけるタンクの水位の和hのピーク値（現在気候h=268mm，将来気候h=328mm）を地下水位の値とし，安定解析を行う．

c) 気候変動を考慮した斜面災害リスク評価

前述の実験結果より得られたせん断抵抗角 ϕ'_{d3} と地下水位hを用いて将来の斜面安全率 F_s を評価する．本研究では，対象とする樽前降下火砕堆積物（Ta-d）は物理試験結果より非塑性（N.P.）であることが明らかにされていることから，粘着力は $c_d=0$ と考え，また，平成30年北海道胆振東部地震では，大凡の崩壊深さは約2.2mとされていることから $z_0=2.2m$ とする¹⁹⁾．図7-11に解析結果を示す．現在気候の

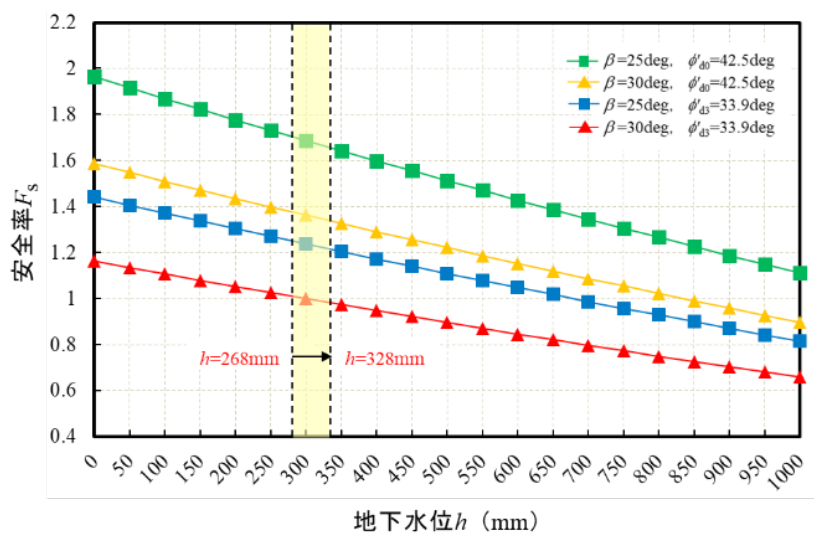


図7-11 将来気候における斜面災害リスク評価

h=268mmに対応する左端では、 $\beta=30\text{deg}$ の線が僅かに $F_s=1.0$ を上回っているが、将来気候のh=328mmに対応する右端では、 $F_s=1.0$ を下回ることが確認できる。以上のことから、簡易的ではあるが、将来気候においては、凍結融解による地盤のせん断抵抗角 ϕ の低下と降雨水量の増加により、斜面角30 deg付近の斜面の災害発生リスクの増加が示された。

7.4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 同じ樽前降下火砕堆積物*Ta-d*においても場所によっては風化の度合いに変化が現れた。本調査の範囲では、日高幌内川流域よりも東和川流域に堆積している樽前降下火砕堆積物*Ta-d*の方が、風化の進行度が大きい。
- 2) 三軸試験によるせん断過程の粒子破碎特性の比較から、せん断過程における粒子破碎量は圧密過程によって生じる破碎量よりも多いことが明らかにされた。なお、この現象は北海道内にある火山灰粗粒土と類似の傾向にある。
- 3) 樽前降下火砕堆積物*Ta-d*を対象とした定圧一面せん断試験（不飽和状態）からは、凍結融解により定圧せん断強さが減少する結果が得られ、凍結融解回数に対応する低減率 α を算出することで、凍結融解の影響を安全率の評価に考慮することが可能となった。
- 4) 1km格子NHRCM20を入力値としたタンクモデルの解析により、将来気候における地下水位の変動hを推定することができた。
- 5) 得られたせん断抵抗角 ϕ と地下水位hの変動を安全率 F_s に考慮することで、将来気候では斜面角30 deg付近の斜面の災害発生リスクの増大が示唆された。

謝辞

利用したデータセットは、文部科学省委託事業により開発・運用されているデータ統合解析システム（DIAS）、気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）の下で提供されたものである。本研究を実施するにあたり、データ提供では、室蘭工業大学 中津川誠 教授、各種試験の実施では、本学 古賀匠、千田侑磨、川村季実佳、鈴木大貴、各君の協力を得た。記して、深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 文部科学省：地震調査研究推進本部：平成30年北海道胆振東部地震の地震活動 概要，地震活動，発震機構と震度 (https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismicity_annual/major_act_2018/)
- 2) 総務省消防庁HP：平成30年北海道胆振東部地震による被害及び消防機関等の対応状況（第35報）
- 3) 地盤工学会：平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団最終報告書，pp.119, 2019.8
- 4) 古賀匠，川村志麻，川村季実佳：北海道胆振東部地震によって崩壊した自然斜面を構成する火山灰質土の物理力学挙動，地盤工学会北海道支部技術報告集，第60号，pp.149-156, 2020.
- 5) 岸田航平，川村志麻：樽前山を噴出源とする降下火砕堆積物の力学特性とその評価，地盤工学会北海道支部技術報告集，第59号，pp.161-168, 2019.1.
- 6) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター：厚真町付近の地質 (<https://www.gsj.jp/>)，2018.11.
- 7) 実務家のための火山灰質土～特徴と設計・施工，被災事例～，北海道の火山灰質土の性質と利用に関する研究委員会，地盤工学会北海道支部pp.14, 2010.12.
- 8) 三浦清一，八木一善，川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破碎，土木学会論文集，No.547/III-36，pp.159-170, 1996.9.

- 9) 三浦清一, 八木一善 : 火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp257-269, 1997.3.
- 10) 川村志麻, 三浦清一 : 北海道に分布する風化残積土の物理・力学挙動とその工学的評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.2, pp.159-170, 2018.6.
- 11) 千田侑磨, 川村志麻, 鈴木大貴 : 気候変動を考慮した厚真川流域にある火山灰斜面の地盤災害リスク評価, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第60号, pp.287-294, 2020.1.
- 12) 環境省 : 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第5次評価報告書第1作業部会報告書 (自然科学的根拠) の公表について, pp.10, 2013.9. (<http://www.env.go.jp/press/files/jp/23096.pdf>)
- 13) 環境省 : 環境省 地域気候変動予測データ (協力 : 気象庁), 2018.12 (http://metadata.diasjp.net/dmm/doc/NHRCM20_ADAPT2013-DIAS-ja.pdf)
- 14) 上田聖也, 中津川 誠, 千田侑磨, 小松麻美 : 流域水収支が検証された北海道全域の高解像度 Downscaling情報の作成, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol.73, No.4, pp.1051-1056, 2019.
- 15) 気象庁 : JRA-55領域ダウンスケーリング (DSJRA-55), 2017.3. (https://jra.kishou.go.jp/DSJRA-55/index_ja.html)
- 16) 気象庁ホームページ : 過去の気象データ (平年値), (<http://www.jma.go.jp/>)
- 17) CommonMPホームページ: CommonMP, (<http://framework.nilim.go.jp/>)
- 18) 菅原正巳, 渡辺一郎, 尾崎睿子, 勝山ヨシ子 : パーソナル・コンピュータのためのタンク・モデル・プログラムとその使い方, 国立防災科学技術センター研究報告第37号, 1996.3.
- 19) S. Kawamura, S. Kawajiri, W. Hirose, T. Watanabe : Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake, Soils and Foundations, Vol.59, pp.2376-2395, 2019.11.