タンクモデルを用いた集中豪雨時の斜面表層部に おける降雨流出浸透特性に関する研究

平成 26 年 2月 21 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

奥岡 莞司

要旨

近年,日本では温暖化に伴う気候変動の影響の一つと捉えられる,短期間集中 豪雨が多発する傾向が見られる.また,日本の国土は大部分が急峻な山地からな り,それに沿って道路・鉄道・家屋などが建設されている場合も多く,短期間集 中豪雨に起因する斜面崩壊が発生した際に被害が大きくなりやすい傾向がある. こうした背景から短時間集中豪雨時における表面流出特性及び雨水浸透特性を把 握することがますます重要となっている.

このような観点から短期間集中豪雨とスコールの類似性に着目して、タイ・カ セサート大学との共同プロジェクトとして、タイのナコンナヨック・プーケット の原位置斜面において、雨量、斜面表層部における表面流出量、斜面内部の間隙 水圧や体積含水率の現地計測をおこなってきた.

本研究では,降雨によって発生する斜面における表面流と地表付近の雨水浸透挙 動を評価する手法として提案される1次元タンクモデルを適用し,そのパラメー タ同定においてカルマンフィルタを用いた逆解析を行った.その適用結果と原位 置計測結果から斜面表層にインク瓶効果が生じることが分かった.さらにインク 瓶効果は表層貯留量の影響を受けていることが推察された.そこで地盤特性や降 雨特性の違いにおける,表層貯留量が雨水流出浸透特性に与える影響について考 察するとともに,斜面の地盤特性の相違が破壊形態に及ぼす影響について検討す る.

ii

目次

第	1章	序	論	••••	••••	•••••	•••••	•••••	••••	•••••	••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	• • • • • • •	••••	1
1	.1	研究	の背	景	•••••	•••••	••••	•••••	•••••	• • • • • • •	• • • • • •	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	1
1	.2	研究	この目	的	•••••	•••••	••••	•••••	• • • • • • •	•••••	• • • • • •	•••••	• • • • • •	•••••	•••••	• • • • • • •	•••••	• • • • • • •	1
1	.3	既往	の研	究	•••••	•••••	••••	•••••	• • • • • •	• • • • • • •	• • • • • •	•••••	• • • • • •	•••••	•••••	• • • • • • •	••••	• • • • • • •	2
1	.4	本論	i文の	構	成…	•••••	•••••	•••••	••••	•••••	••••	•••••	•••••	•••••	• • • • • •	•••••	• • • • • • •	•••••	4
第二	2 章	原	位置	計	則	• • • • • • •	• • • • • •	• • • • • •	••••	••••	•••••	•••••	••••	••••	• • • • • •	••••	• • • • • • •	•••••	5
2	.1	ナコ	ンナ	Э	ック	にお	ける	原位	[置言	+測.	••••	•••••	•••••	•••••	• • • • • •	•••••	•••••	•••••	5
	2.1	1.1	原位	置	計測(の概察	要と	結果	••••	•••	••• •••	• • • • • •	• • • • • • •	• • • • • • •	• • • • • •	• • • • • • •	••• •••		5
	2.1	1.2	時系	列	デー	タ	• • • • • •	•••••	• • • • • •	•••••	• • • • • •	•••••	• • • • • •	•••••	•••••	•••••	• • • • • • •	•••••	6
2	.2	プー	・ケッ	Ի	にお	ける	原 位	置計	- 測	• • • • • • •	••••	•••••	••••	•••••	••••	•••••	•••••	, 	7
	2.2	2.1	原位	置	計測(の概察	要と	結果	••••••	••••	••• •••	• • • • • •	• • • • • •	• • • • • • •	• • • • • •	• • • • • • • •	••••		7
	2.2	2.2	時系	列	デー	א ש	• • • • • •	• • • • • •	• • • • • •	•••••	• • • • • •	•••••	• • • • • •	••••	• • • • • •	•••••		• • • • • • •	9
2	.3	タン	´クモ	デ	ル解	析で	用い	る各	種扎	旨標の	の 算	定	• • • • • •	•••••	• • • • • •	•••••	• • • • • • •	•••••	.10
	2.3	3.1	欠損	雨	量の算	算定.	• • • • • •	••••	•••••	•••••	••••	• • • • • •	•••••	••••	••••		• • • • • • •	•••••	.10
	2.3	3.2	流出	量	の算り	定	• • • • • •	• • • • • •	• • • • • •	•••••	• • • • • •	• • • • • •	• • • • • •	••••	• • • • • •	•••••		• • • • • • •	.10
第:	3章	1	<u> 欠</u> 元 夕	タン	/ ク モ	デル	· • • • • •	•••••	•••••	• • • • • • •	••••	•••••	•••••	•••••	••••	•••••	•••••	••••••	.11
3	.1	1次	元タ	ンジ	クモラ	デルの	♡概Ⅰ	要	• • • • • •	• • • • • • •	• • • • • •	•••••	•••••	•••••	• • • • • •	• • • • • • •	•••••	•••••	11
3	.2	1 次	元タ	ン	クモラ	デルの	りパ	ラメ	ータ	同定	三手	法	•••••	•••••	• • • • • •	•••••	• • • • • • •	••••	.11
	3.	2.1	カル	~~	ンフ	イル	タ	•••••	• • • • • • •	• • • • • • •	•••••	•••••	•••••		••••	•••••	•••••		12
	3.2	2.2	誤 差	計	算	•••••	• • • • • •	•••••	•••••	• • • • • • •	••••	•••••	••••	•••••	••••	•••••	•••••	••••••	.13

第4章 タ	ンクモデルの実際の斜面への適用	15
4.1 タイ	↑・2 サイトへの適用結果	15
4.1.1	ナコンナヨックサイトへの適用結果	15
4.1.2	プーケットサイトへの適用結果	18
4.2 水收	Q 支 分 析	
4.2.1	ナコンナヨックの水収支	20
4.2.2	プーケットの水収支	21
4.2.3	地盤特性の違いが雨水流出浸透挙動に与える影響	22
4.3 表	層 貯 留 量 に 関 す る 考 察	24
4.3.1	降雨特性が雨水浸透挙動に与える影響	24
4.3.2	原位置 SWCC との比較	26
4.3.3	豪雨に伴う斜面崩壊	27

第	5	章	ま	と	め	と	今	後	の	課	題		2	29
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	---	----

参	考	文南	伏	•••	• • • •	••••	••••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	••••	•••	•••	• • • •	•••	••••	•••	••••	••••	••••	••••	•••	•••	••••	••••	3	1
謝	辞	••••	•••	•••	••••	•••	•••	•••		•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	•••	••••	•••	•••		•••	• • • •	••••	•••	••••	••••	•••	• • • •	••••	••••	3	33

第1章 序論

1.1 研究の背景

斜面崩壊は我々の生命と日常生活に深刻な被害を及ぼす最も危険な自然災害 の一つであり、降雨は斜面崩壊の主たる要因の一つである.近年では地球温暖化 に伴う気候変動の影響の一つと据えられている局所的な短時間集中豪雨の発生が 日本で増加しており、気象庁による気候変動の報告によると、図 1.1 に示すよう に時間雨量 50 mm を超える雨が着実に増えてきている.また、図 1.2 に示すよう に時間雨量 80 mm を超える雨も 1976 年~1986 年と 1998 年~2008 年の 10 年間の 平均発生回数で約 2 倍に増加している.

また、日本は国土の大部分が急峻な地形からなり、斜面に近接して住宅地及び 道路・線路が形成されている場合が多く、斜面災害発生時の被害が大きくなりや すい傾向にある.短期間集中豪雨の増加により、それに起因する斜面崩壊などの 土砂災害の増加が懸念されている.実際に2012年8月14日に発生した短期間集 中豪雨では、京滋バイパス宇治トンネルにおいて斜面崩壊に伴う土砂災害が発生 している.また、斜面災害に対する損失を最小限に止めるためには、早期警戒に 対する意思決定が求められるが、その是非を判断するための基準として、降雨特 性と斜面安定性との関連を適切に評価する必要がある.

以上の観点から,斜面崩壊のメカニズム,つまり短期間集中豪雨時の雨水流出 浸透特性を解明することが喫緊の課題といえる.

1.2 研究の目的

本研究では、特に短期間集中豪雨時における地表付近の流出浸透挙動をより詳細に把握することを目的とする.その際に流出浸透挙動に大きな影響を与えると 考えられる表層貯留量に焦点を当てて議論する.表層貯留量とは斜面の地表面付 近に一時的に保持される水分量であるので、地盤特性によりその影響力は変わる ものと考えられる.そこで、地盤特性の異なる2サイトにおいて、1次元タンク モデルを適用した.そしてその解析結果を原位置計測結果と併せて考察し、地表 面の流出浸透挙動について詳細な分析を行う.これにより降雨時の降雨特性の違

い,地盤特性の違いという観点から斜面安定性に与える影響について検討する.

1.3 既往の研究

(a) 既往の研究との関連

近年増加傾向のある短期間集中豪雨の特性を考慮すると、過去の豪雨災害発生 時の累積降雨量、および時間降雨量を組み合わせた基準である従来の防災体制を そのまま適用することが必ずしも適切ではないと推察される.また、降雨に起因 した斜面崩壊という観点では、降雨に対して地中にどの程度の水分が浸透するか を解明することが本質的に重要な課題と考えられる.地盤内への水分浸透特性に ついての室内試験、および原位置計測は数多く行われているが²⁾³⁾、原位置計測、 特に短期間集中豪雨の原位置計測は、その発生回数が限定的でありかつどの地域 で発生するかを予測することが困難であるため、国内では十分な計測データを確 保することは難しいと推測された.

そのため、大津⁴⁾は短期間集中豪雨の降雨特性と熱帯性気候地域におけるスコ ールの降雨特性の類似性に着目した.熱帯性気候地域では雨季にあらゆる箇所に おいて高頻度でスコールが発生しており、斜面への降雨浸透に着目した原位置計 測が容易であると推定される.地質条件の相違のため斜面崩壊の発生機構が日本 と異なる可能性もあるが、その原因となる斜面内への降雨浸透特性の把握という 観点では類似性を見ることができると考えられた.

このような観点から、大津ら⁴⁾は短期間集中豪雨発生時の斜面内部への降雨浸透のメカニズムの解明を目的として、カセサート大学(タイ)との共同プロジェクトとして、タイのナコンナヨック、およびプーケットにおいて、それぞれ 2007年9月、2011年7月より原位置計測を行ってきた.

これまでに大津ら⁵⁾は斜面崩壊の一つである不飽和領域における浅層崩壊に着 目し,降雨時における斜面内部への雨水浸透挙動を予測する手法として,不飽和 領域を考慮した拡張型マルチタンクモデルを提案してきた.さらに各計測サイト の観測結果と併せてそのモデルの妥当性,および適用範囲について検証してきた.

堀田⁶は表層タンクのパラメータ同定をカルマンフィルタを用いて行い,実斜 面における観測値との比較・検討により高い精度で降雨時における雨水の挙動を 表現した.一方で,不飽和領域タンクのパラメータ同定はニューラルネットワー クを用いて行ったが,解析結果と観測値との間に大きな差が見られた.

Thamrongsak SUWANISHWONG ら⁷⁾はその不飽和領域タンクのパラメータ同定 の精度向上を目的とし、不飽和領域タンクのパラメータ同定を表層タンクと同様 にカルマンフィルタを用いて行うことを試みた.

川合⁸⁾は不飽和領域マルチタンクモデルのパラメータ同定手法の改良を行い, 不飽和領域における拡張型3連マルチタンクモデルの適用性を検討した.

古賀⁹⁾は原位置計測結果に基づいた Try&Error より1次元タンクのパラメータを推定し、斜面表層部における短期間集中豪雨時の斜面安定性評価を行った.

本研究では、カルマンフィルタを用いて斜面表層部における1次元タンクモデ ルのパラメータ同定を行う.これにより、より信頼性の高いパラメータを扱うこ とでモデルの精度向上が期待できる.さらに原位置計測結果及び1次元タンクモ デルによる解析結果を用いて、降雨時の降雨特性の違い及び地盤特性の違いとい う観点から斜面表層部における雨水流出浸透挙動について詳細な分析を行う.

(b) 基本理念

(b-1)ホートン流

降雨に起因して発生する表面流出と斜面内部への雨水浸透は地盤の浸透能と 相関をもつとされている.

Horton¹⁰⁾は表面流出の発生機構を図 1.3 に示す. これに示すように,一定降雨 強度が継続した場合,地表付近が局所的飽和状態に到達した時点から表面流出が 開始し,表面流出が増加するとともに,浸透量が低減する. 同様に,降雨強度の 変化や規模に応じた表面流出の発生は図 1.4 に示す通りである. 同図に示すよう に,表面流出は降雨強度が浸透能を上回る際に発生し,これはホートン型地表流 と総称されている.しかし,これまで雨水流出浸透特性を包括的に解明する研究 はほとんどなされておらず.また図 1.3 および図 1.4 においては標記されていな いが,表面流出量と浸透量以外に地表付近に保水される水量,つまり表層貯留量 が存在し,河川工学の分野でもその存在が認められている.本研究では,主に降 雨時の流出特性について検討する際に用いるものとする.

(b-2)水分特性曲線

土壌水分特性曲線(Soil Water Characteristic Curve)(以下,SWCC)は土中の体積含水率とサクションの関係を表す.土中の不飽和領域における保水特性は

SWCCを用いて評価される.SWCCは土のコンシステンシーと密接な関係があり, 試料によって異なる挙動を示すとされている¹¹⁾.図1.5に示す飽和からの排水過 程,残留体積含水率からの吸水過程で得られる曲線をそれぞれ主排水曲線,主吸 水曲線と呼び,任意の水分量から排水,もしくは吸水によって得られた水分特性 曲線は走査曲線と呼ばれる.ここで,集中豪雨による斜面崩壊は不飽和土の吸水 過程に対応するため,斜面の安定性を検討する際,吸水過程で精度の高い水分特 性曲線を得る必要がある.

一般的に、室内試験によって求められる SWCC は図 1.5 に示すように吸水過程 と排水過程で同じ体積含水率の値に対するサクションの値が異なるというヒステ リシスを描くとされている.ここで同図において吸水過程に着目すると、まず 体積含水率が一定のままサクションが 0 付近まで回復した後に、体積含水率が 上昇している.これは土中の間隙が微細で複雑であることから生じるインクビ ン効果という現象であり、ヒステリシスが生じる要因の一つであると考えられ ている.また、Chaleiwchalard¹²⁾はタイ・ナコンナヨックにおける原位置 SWCC は室内試験結果で得られた SWCC とは異なる結果となることに加えて、吸水過程 と排水過程で明確なヒステリシスが生じないことを示している.

本研究では、原位置 SWCC の特性について、表層 貯留量と併せて議論した.

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全5章からなる.

第1章において,序論として研究の背景,目的,既往の研究との関連,及び本研究に用いる基本理念について述べた.

第2章では、原位置計測の概要と結果を説明したのち、第3章で述べるタンク モデル解析に用いる流出量及び欠損雨量の算定方法について説明する.

第3章では、本研究で用いる1次元タンクモデルの概要、およびそのパラメー タ同定手法について説明する.

第4章では,解析結果および原位置計測結果により,降雨時の降雨特性の違い, 地盤特性の違いという観点から斜面表層部における雨水流出浸透挙動について分 析を行い,表層貯留量と体積含水率,SWCCの相関を併せて検討する.

第5章では、まとめと今後の課題について述べる

第2章 原位置計測

2.1 ナコンナヨックにおける原位置計測

2.1.1 原位置計測の概要と結果

(a) 斜面の概要と原位置計測の概要

短期間集中豪雨のような局所的短期間集中降雨時の,斜面における雨水流出お よび雨水浸透のメカニズムの解明を目的として,タイ・バンコクの北東約100km の地点に位置するナコンナヨックの道路脇斜面において2007年9月から原位置計 測を行っている.当該斜面に関しては集中豪雨により04年8月に崩壊が発生し,こ れを埋め戻した斜面である.

また、当該斜面の地質は、中生代ジュラ紀から白亜紀の流紋岩の風化帯からなっており、表層部は高温多湿の条件下での強風化によって粘土化したものである. 斜面中腹部 GL-0.6m, GL-1.0m および法尻部 GL-0.6m, GL-1.0m における粒径加 積曲線により、粒度分布は斜面法尻部 GL-0.6m 以外 D₅₀が約 0.03mm 以下である ことから斜面を構成している地質は細粒分が卓越していると判断される.しかし、 法尻部 GL-0.6m のように法尻部の浅い領域においては、部分的にかなりレキおよ び砂が混入している箇所もある.また、三角座標によるから、中腹部 GL-0.6m は 葉 こり砂質細粒土、中腹部 GL-1.0m は砂質細粒土、法尻部 GL-0.6m は粘性土質 砂質礫、法尻部 GL-1.0m は砂礫まじり細粒土で構成されていると推定される.次 に、室内試験によって得られた当該斜面の力学特性を表 2.1 に示す.透水特性に ついては、表層部の飽和透水係数は、10⁻⁷~10⁻⁸m/sec であった.この結果より、 同斜面で優勢である細粒分が卓越している地盤においては、間隙率が比較的大き くかつ比較的低透水性であると解釈できる.

次に,計測器配置に関する断面図,および平面図を図 2.1,および図 2.2 に示す. 同図に示すように,当該斜面では,土壌水分計,テンシオメータ,および雨量計 を設置して,それぞれ体積含水率,間隙圧,表面流出量,および降雨量を計測し ている.また,当該斜面における斜面全体の集水面積は 575m²であり,中腹部の 集水面積は図 2.2 における A₂=150m²,法尻部の集水面積は A₃+A₄=425m²とする. なお,それぞれの計器の計測間隔は 2008 年までは 10 分間隔のみで計測していた が 2010 年より,無降雨時には 10 分間隔,降雨時のみ 1 分間隔となるように自動

制御している.

(b) 原位置計測の結果

次に原位置計測結果を示す. ナコンナヨックにおいて,2010年3月13日から 2010年12月6日までに観測された降雨のうち,累積降雨量が10mmを超える全 降雨を本研究における対象降雨とする. なお,ナコンナヨックサイトの計測デー タとしては2008年および2010年の2年間のデータがあるが,本研究では1分間 隔で議論することが前提となっているため,1分間隔データが取れている2010年 のみに限定する. このことから対象降雨が合計40降雨となっている.

対象降雨の累積降雨量と最大時間雨量の関係,及び累積降雨量と10分間最大 雨量の関係を図 2.3 に示す.なお,雨の降り終わりは降雨量 0mm が 1 時間以上続 いた時点としている.雨の強さと降り方について気象庁は表 2.2 のように定義し ている.同図に示すように,ほぼ全ての降雨が 10mm/hour 以上の降雨であり,「強 い雨」とされる 20mm/hour~30mm/hour の降雨や「激しい雨」とされる 30mm/hour ~50mm/hour の降雨が数多く計測されている.また,同図において累積降雨量と 最大時間雨量の 1:1 の直線に近い部分にプロットが集中していることが確認され る.以上より,当該斜面において高強度の降雨が短期間に集中する特性を持った 降雨が観測されているといえる.また,最大 10 分間雨量については全ての降雨に ついて 5mm/10min 以上であることから,これらの降雨は瞬間的には最大 30mm/hour 以上の降雨強度を有しており,豪雨を対象としているといえる.

2.1.2 時系列データ

図 2.4 にナコンナヨックにおける 2010 年 9 月 7 日 0:14 から 146 分間に発生した 1 分間隔の降雨量と表面流出量を示す.なお,時系列データの考察においては,転倒ます型雨量計による雨量計測がその計測機構により 0.5mm ずつの離散値となっているため,水路に直接降った雨水と表面流出量を分離することは難しい.そのため,ここでは水路に直接降った雨水も表面流出量に含まれている.ただし,ナコンナヨックサイトの水路面積が 36.74m² であることから,集水面積に占める水路面積が占める割合は 7.2%程度である.

同図に示すように、降雨量 2.0mm/min で、約 50%の表面流出量のピーク流量が

発生していることが確認できる.また同図において,表面流出量のハイドログラ フと降雨波形は調和的であるが,表面流出量のピークが降雨量のピークに比べて 遅れていることが確認できる.これは,ナコンナヨックは斜面が大きいために, 法尻部まで雨水が流れてくるまでに時間がかかるためであると解釈される.さら に,40分ごろの流出のピークと70分ごろの流出のピークについて着目すると, 初めのピーク時は約50%の表面流出量が発生しているのに対して,2回目のピー ク時は降雨強度が半分であるにも関わらず,約70%の表面流出が発生している. このピーク時の流出比の差異は,前述したホートンの浸透理論における浸透能の 低下によると推察される.すなわち,雨水が十分に供給される場合,降雨時間の 経過とともに浸透能が低下して最終浸透能に収束するとされているが,降雨波形 が複雑な実降雨の場合にも,浸透能の低下が起こるといえる.

また,図 2.5 にナコンナヨックにおける 2010 年 6 月 20 日 0:14 から 146 分間に 発生した 1 分間隔の降雨量と表面流出量を示す.同図に示すように,降雨量より も表面流出量のほうが大きくなっている.これは斜面の計測範囲より上流から流 れてきた表面流出量が計測値に含まれているという可能性が考えられる.本研究 ではこのような計測値は除外して考えることとする.

2.2 プーケットにおける原位置計測

2.2.1 原位置計測の概要と結果

(a) 斜面の概要と原位置計測の概要

プーケットにおける原位置計測は、プーケット島南西部カタ地区のカタ小学校 に近接する切取り道路斜面において 2011 年 7 月から行われている.当該斜面は目 前の道路に沿って傾斜を持っており、その平均傾斜は約 1 対 1.3 (V:H)、すなわ ち約 37.5 度である.

また、当該斜面の地質は、タイにおいて斜面崩壊の発生の危険性が最も高い、 中生代の花崗岩である.加えて、比抵抗電気探査の結果¹³⁾により、極めて不均質 ではあるが、表層付近は風化が進んでまさ土化している一方、深部では風化せず に岩のまま残った岩塊が存在する斜面であるといえる.このことから、斜面全体 という大きな観点で見れば、表層ほど風化が進んでいるため、浅い領域ほど透水 係数も大きくなることが想定される.なお、ナコンナヨックサイトが崩壊土塊を 用いて埋め戻した盛土斜面であったのに対して、プーケットサイトは自然斜面であるため不均質な地盤であることに留意する.

また,原位置試験によって求めた地下水観測井付近,および表層地盤の飽和透水係数を表 2.3 に示す.これにおいて,表層地盤の飽和透水係数が 10⁻¹~10⁻² m/sec 程度大きいことから,深部にいくにつれて透水性が低下していることが確認され る.このことから,ナコンナヨックサイトにおける飽和透水係数が 10⁻⁷~10⁻⁸ m/sec であることを踏まえると,プーケットサイトはナコンナヨックサイトに比べ,透 水性の高い地盤であると解釈される.

次に,計測器配置に関する断面図,および平面図を図 2.6,図 2.7 に示す.同図 に示すように,当該斜面では,土壤水分計,テンシオメータ,水位計,および雨 量計を設置し,それぞれ体積含水率,間隙圧,表面流出量,および降雨量を測定 している.また,当該斜面全体の集水面積は 30.15m²であり,本研究では法尻部が 斜面全体の4分の1であると考え,法尻部の集水面積を 7.538m²としている.な お,それぞれの計器の計測間隔が,無降雨時には 10 分間であり,降雨時のみ 1 分間となるように自動制御している.

(c) 原位置計測の結果

原位置計測結果を示す. プーケットにおいて,2012 年 3 月 13 日から 2012 年 12月6日および 2013 年 9月 29日から 2013 年 11月3日までに観測された降雨の うち,累積降雨量が 10mm を超える全降雨を本研究における対象降雨とする. な お,2012 年 8月31日までは降雨量,表面流出量のみの計測であるが,2012 年 8 月31日以降はこれらに加え,体積含水率および間隙圧の計測も行っている.2012 年の対象降雨は 58 降雨であり,8月31日までが 37 降雨であり,それ以降が21 降雨である.2013 年の対象降雨は 10 降雨である.

また、2012年のプーケットサイトにおける降雨についてもナコンナヨックサイトと同様に対象降雨の累積降雨量と最大時間雨量の関係、及び累積降雨量と10分間最大雨量の関係を図 2.8 に示す. なお、ここでは 2013年については 2012年と同じ傾向を示すため省略する. 同図に示すように、ほぼ全ての累積降雨が10mm/hour以上の降雨であり、「強い雨」とされる 20mm/hour~30mm/hourの降雨や「激しい雨」とされる 30mm/hour~50mm/hourの降雨が数多く計測されている.また、同図において累積降雨量と最大時間雨量の 1:1 の直線に近い部分にプロッ

トが集中していることが確認される.以上より,当該斜面において高強度の降雨 が短期間に集中する特性を持った降雨が観測されているといえる.また,最大 10 分間雨量が 10mm/10min (時間雨量 60mm/hour の降雨強度)を超える降雨が 3 月 13日から 12月 6日までに 22 降雨観測されており,このような降雨は瞬間的には 滝のように降る「非常に激しい雨」が降っているといえる.ただし,プーケット サイトについては,強度の違いが雨水流出浸透特性に与える影響についても考慮 するため,低強度の降雨についても対象降雨としている点に留意されたい.

2.2.2 時系列データ

まず,図 2.9 にプーケットにおける 2012 年 10 月 17 日 22:20 から 39 分間に発 生した 1 分間隔の降雨量と表面流出量を示す.ただし,プーケットサイトの有効 集水面積は 30.15 m²で,水路面積が 1.44m²であることから,集水面積に占める水 路面積が占める割合は 4.8%程度である.このように集水面積に占める水路の割合 がナコンナヨックサイトより小さいことからその影響も小さいと解釈される.

同図に示すように、降雨量 2.5mm/min で、約 36%の表面流出量のピーク流量が 発生していること、および表面流出量のハイドログラフは降雨波形と調和的であ ることが確認できる. ピーク流量について図 2.9 と図 2.4 を比較すると, 図 2.9 においては 2.5mm/min の降雨強度で約 36%の表面流出量であったが,図 2.4 にお いては 2.0mm/minの降雨強度で約 50%の表面流出量が発生していることが確認で きる.この差異は、ナコンナヨックサイトは比較的透水性の低い風化流紋岩から 構成されている斜面であるため、流出にまわる割合が大きくなっていると推察さ れる.また,表面流出の開始時間に着目すると,降雨開始後およそ5分後である ことが確認される.前述したように、ここでは水路に直接降った雨水も表面流出 量として計測されているが、水路の割合は小さいためこの結果は妥当であると解 釈 される. また, 前 述 した ホートン 流 出の 模 式 図 に ある よう に, 当 初 は 降 雨 の 10% 以下の流出量であるが、降雨強度の増加とともに、流出量の増加(流出比の増加) が 急激 に 発 生 し , 降 雨 ピ ー ク 時 で 約 36 % 程 度 の 流 出 量 (流 出 比 0.36) が 認 め ら れ る. 逆の観点で捉えれば, 2.5mm/min (時間雨量 150mm/hour) を超える高強度降 雨でも、降雨の60%以上は斜面に浸透量、もしくは表層貯留量としてストックさ れることが確認できる.降雨全体で見た場合の流出比は27%程度であり,39分間 に 27.5mm の降雨が集中しても 70%以上は斜面にストックされることとなる. し

かし、当該斜面においても、ホートン流出は確かに発生している.

2.3 タンクモデル解析で用いる各種観測値の算定

本研究において、3章で述べるカルマンフィルタを用いた1次元タンクモデル による解析を実際の斜面に適用することで、斜面表層部における雨水の流出浸透 特性を把握しようと試みている.その過程で、あらかじめ設定しておく必要があ る欠損雨量、観測値として用いる流出量について述べる.

2.3.1 欠損雨量の算定

実際の斜面は表層部に木や草などの植物が生えており、それらの植物が流出の 妨げとなるので、流出の開始は降雨の開始時間から遅れて生じる.この植生によ る影響を考慮しているのがタンクモデルの流出孔までの高さ H であり、欠損雨量 と呼ばれる.斜面にタンクモデルを適用する際は、それぞれのタンクの流出孔ま での高さ H をあらかじめ設定する必要がある.2012 年に観測された降雨に関して 1 雨の累積雨量および総流出量をそれぞれプロットしたものに線形近似を適用す ると、図 2.12 のようになる.この図に示すように各降雨の累積雨量と総流出量は 概ね近似線に沿うかたちとなることから、欠損雨量は、プーケットにおいては各々 のタンクで一様に近似線の X 切片の値 2.7mm、ナコンナヨックにおいては同様に 9.0mm とした.

2.3.2 流出量の算定

斜面法尻部における流出量は、以下に示す式(2.1)によって単位変換した1分間 流出量を加算して求めた10分間流出量を用いる.

$$q_R = \frac{Q_R}{A_R} \tag{2.1}$$

ここに *q_R* [mm/1min] は法尻部の流出量, *Q_R* [L/1min]は計測された表面流出量, *A_R*はそれぞれの計測サイトにおける法尻部の集水面積で, ナコンナヨックサイト においては 425, プーケットサイトにおいては 7.5375 であり,単位は[m²]である. これは第 3 章でタンクモデル解析を行う際の計測値として用いる.

第3章 1次元タンクモデル

本章では、1次元タンクモデルの概要、およびそのパラメータ同定手法につい て説明する.

3.1 1次元タンクモデルの概要

タンクモデルは 1972 年に菅原¹⁴⁾によって考案された広域を対象とした流出計 算手法であり、簡易に各流域の水収支および水循環を表現することを可能とする モデルである.本研究においては、元々研究対象としていたプーケットの斜面が 比較的小さいために、図 3.1 に示すように斜面全体を一つのタンクモデルで表現 するものとした.ここで、比較的大きいナコンナヨックの斜面では、中腹部と法 尻部における雨水流出浸透挙動に違いが生じる可能性があるが、プーケットの斜 面では、淀川水系のような広域を対象とした従来のタンクに比べれば非常に小さ いと考えられるため、挙動の差異はわずかであると解釈される.したがって、斜 面全体を一つのタンクで表現することにプーケットサイトに関しては、問題はな いと推察される.ここで、タンクモデルにおいて、表面流出量 q_Rおよび地中への 浸透量 q₁は式(3.1)、式(3.2)を用いてそれぞれ算出される.

If
$$\begin{aligned} X - H &\leq 0 \qquad q_R = 0\\ X - H &> 0 \qquad , \qquad q_R = \alpha \cdot (X - H) \\ q_I &= \beta \cdot X \end{aligned}$$
(3.1)
(3.2)

ここに, X は各タンクの貯留高, H は流出孔までの高さ,α は流出係数,β は浸透 係数を表す.なお,このモデルは地中における水分変動挙動をモデル化の対象と しておらず,斜面地表付近の水収支の分析を目的としてモデル化していることに 留意されたい.

3.2 1次元タンクモデルのパラメータ同定手法

1 次元タンクモデルにおいては、逆解析手法の一つであるカルマンフィルタを

用いて未知パラメータの抽出を行い, 誤差計算をすることにより最適パラメータを求める.以下でそのパラメータ同定の過程について説明する.

3.2.1 カルマンフィルタ

カルマンフィルタは、未知パラメータがある離散型の状態変化において線形方 程式に従っている場合に適用することができる.図 3.2 に示すフローチャートよ り、ある状態 t から状態 t+Δt に遷移する場合には、式(3.3)の状態方程式を用いて 表すことができる.また状態 t+Δt に遷移した後にある観測値が与えられた場合に は、式(3.4)の観測方程式を用いて未知パラメータを更新することで最適なパラメ ータを求めることができる.このフローチャートを図 3.2 に示す.

$$X(t + \Delta t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + \mu(t)$$
(3.3)

$$Y(t + \Delta t) = C(t + \Delta t)X(t + \Delta t) + \varepsilon(t)$$
(3.4)

ここに X(t)は未知パラメータ, Y(t)は観測値, A(t)は遷移行列, B(t), および U(t) は既知ベクトル, C(t)は観測行列, µ(t)はシステムノイズ, および ε(t)は観測ノイ ズである. カルマンフィルタの観測方程式に必要となる観測値として,本研究で はタンクの側孔からの流出量のみを対象とする.

ここで、表層タンクにおける水収支の関係式を式(3.5)に示す.

$$\frac{dX_L}{dt} = (R - E) - \alpha_L \cdot (X_L - H_L) - \beta_L \cdot X_L$$
(3.5)

また,前述したようにカルマンフィルタの概念は,未知パラメータがある離散 型の状態変化において線形方程式に従っている場合に適用することができるが,1 次元タンクモデルにおける構成式は非線形であるため,本研究ではテーラー展開 によって線形化を行っている.

X(t), α(t), β(t)はテーラー展開を用いて式(3.6)から式(3.8)で表される.なお, 2次以高の微小項は無視している.

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \Delta t \cdot \frac{dX(t)}{dt}$$
(3.6)

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + \Delta t \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt}$$
(3.7)

$$\beta(t + \Delta t) = \beta(t) + \Delta t \cdot \frac{d\beta(t)}{dt}$$
(3.8)

ここで,表層タンクにおける雨水流出過程,および浸透過程のカルマンフィルタの各行列式は以下の式(3.9)から式(3.14)で表される.

$$X(t) = \begin{bmatrix} \frac{dX_L}{dt} & \frac{d\alpha_L}{dt} & \frac{d\beta_L}{dt} \end{bmatrix}^T$$
(3.9)

$$Y(t) = \left[\frac{dq_{R,L}}{dt}\right]^T$$
(3.10)

$$A(t) = \begin{bmatrix} -(\alpha_L + \beta_L) & -(X_L - H_L) & -X_L \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.11)

$$B(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{T}$$
(3.12)

$$C(t) = \begin{bmatrix} \alpha_L & X_L - H \end{bmatrix}$$
(3.13)

$$U(t) = \left[(R - E) - \alpha_L \cdot (X_L - H_L) - \beta_L \cdot X_L \right]$$
(3.14)

上述した流出浸透計算の行列式において,表層部におけるタンクの流出量の差 分を数値解析のインプットデータとして与え,逆解析によって流出係数 α,およ び浸透係数 β のパラメータセットを得る.この際にインプットデータとして,2 章で述べた観測流出量および解析浸透量を与える.こうして得られたパラメータ セットの中で,0<α<1 かつ 0<β<1を満たすものだけを抽出し,3.2.2で説明す る誤差計算に代入するパラメータセットとする.

3.2.2 誤差計算

まず、カルマンフィルタで得られたパラメータセットをそれぞれタンクモデル

に代入し,解析流出量,および解析浸透量を得る.そして,観測値と解析値の誤差の和,および最大値を計算し,それぞれのパラメータセットの偏差値を式(3.15)で求める.ここでは,n個のパラメータセットが得られているとする.

$$y_i = \frac{10(x_i - \mu_i)}{\sigma_i} + 50 \quad (i = 1 \sim n)$$
(3.15)

ここに、y_iは偏差値、x_iは誤差、μ_iは誤差の平均、σ_iは誤差の標準偏差を表す. 最後に、式(3.16)で偏差値の和を求め、その和が最小となるパラメータセットi を最適パラメータとする.

$$z = \sum_{i=1}^{n} y_i \tag{3.16}$$

ここに、yiはそれぞれの偏差値、zは偏差値の和、nはパラメータの個数を表す. なお、この概要を図 3.3 に示す.

以上の手法を用いて最適パラメータを同定し,水収支分析を行う.この際,よ り高い精度で誤差計算をために1分間隔で計測された降雨量,表面流量,および 土壌中の体積含水率の計測データを用いて1次元タンクモデルで解析を行う.

第4章 実際の斜面への適用

本章では、1次元タンクモデルを2サイトに適用し、最適パラメータを得る. このパラメータの精度検証をした上でそれぞれの地表付近の水収支を見たところ、 斜面に流入した水分量のうち浸透にまわる量と斜面の表層付近に一時的に保持さ れる表層貯留量があることが分かった.ここで表層貯留量の特性を調べるために 2サイトを比較することで地盤条件の違いにおける比較、および累積降雨量、10 分間最大雨量との関係から降雨特性の違いによる比較を行った.また、表層貯留 量を体積含水率の推移,原位置SWCCと併せて検討し、その相関関係を確立する.

4.1 タイの 2 サイトに対する適用結果

4.1.1 ナコンナヨックサイトへの適用結果

まず, ナコンナヨックサイトにおいて1次元タンクモデル解析をおこなって得 られた最適パラメータの一覧とともに, そのヒストグラムをそれぞれ表 4.1, 図 4.1 に示す.同図より, 流出係数においては, 多少のばらつきは見られたものの, 0.2~0.4 付近に分布した.また浸透係数においては, 1 つの降雨を除き 0.001~0.004 付近に分布した.

(a) パラメータの精度検証

まず,得られたパラメータの精度を検証する.この最適パラメータセットの中から5月24日と9月26日の降雨波形,解析流出量波形,計測流出量波形,及び流出量の計測値と解析値の相関を取ったものをそれぞれ図4.2,図4.3に示す.

降雨開始前の地盤状態については、 5 月 24 日の降雨は先行降雨があり、9 月 26 日の降雨は先行降雨がなかったものとする、9 月 26 日においては、流出量の解 析値は比較的高い再現性を持っていると言える、5 月 24 日においては流出量の解 析値の方が計測値よりも立ち上がりの時間が早く、さらにピーク流出量に関して も計測値の方が解析値よりもやや大きいという結果になった. しかし立ち上がり の時間の差は 3 分程しかなく、ピーク流出量に関しても値が大きく離れているわ けではないことから、5 月 24 日の低サクション降雨に関しても再現性があると言 って問題ないと考える. しかし、やはり先行降雨がなかった降雨よりも先行降雨

があった降雨におけるモデルの精度が低い.そこで先行降雨があった降雨におけ るモデルの精度向上について考察を加える.

ここで、ナコンナヨックにおいて 1 分間隔データが取れている 2010 年データ において全降雨の降雨履歴を表 4.2 に示す. この表において黄色に色付けがされ ている 7 つの降雨は前降雨終了時からの経過時間が比較的短いものであり、先行 降雨があったものである.サンプル数を増やすために、これらの降雨の流出量の 解析値および計測値を図 4.4 に示す.

同図より,全体的に言える傾向として,解析流出量のピーク値が計測値のピー ク値よりも小さくなることがいえる.この問題点に対して考察を加えた.誤差計 算の期間の修正である.すなわち,誤差計算を広範囲で取りすぎてしまうのでピ ーク値にずれが生じると考えた.これに対して誤差計算を立ち上がりのみに関し て行う手法により精度向上を目指した.

誤差計算を立ち上がりのみを対象として行ったことにより得られた最適パラ メータを表 4.3 に示す.また、このときの 5月 24 日と 9月 26 日の降雨波形、解 析流出量波形、計測流出量波形をそれぞれ図 4.5、図 4.6 に示す.図 4.5 を見ると、 整合性があるのは立ち上がりのみで、立ち上がり以降は降雨がなくなると同時に 解析流出量もなくなってしまい、全く異なった推移をする.これは、流出係数の 値が大きいために、降雨量のほとんどがそのまま流出量にまわっているためであ る.このことから、降雨開始前の地盤状態に関わらず、誤差計算は立ち上がりの みよりも降雨全体で行った方が、降雨期間全体における 再現性が高いといえる.

また 2 章で述べたように、これは飽和透水係数がプーケットサイトにおいては $10^{-4} \sim 10^{-6}$ m/sec で、ナコンナヨックサイトにおいては $10^{-7} \sim 10^{-8}$ m/sec である. また、同定した浸透係数 β も同様にプーケットに比べ $10^2 \sim 10^3$ ほどのオーダーの 違いがある.このことを考慮すれば、妥当な結果であると推察される.

(b) 同定したパラメータの特性について

以上の考察より、ナコンナヨックサイトにおいての、対象期間中の降雨につい てそれぞれ求めた最適パラメータは、全て高い精度で再現できていると考えられ る.ここで、得られたパラメータと降雨特性の相関について考える.10分間最大 雨量と流出係数の相関、累積雨量と流出係数の相関、及び10分間最大雨量と浸透 係数の相関、累積雨量と浸透係数の相関を取ると、それぞれ図4.7、図4.8に示 すようになった.図 4.7 より,流出係数においては,降雨特性との相関は見られ なかった.また図 4.8 より,浸透係数と 10 分間最大雨量の相関図において, 10 分間最大雨量と浸透係数は,10 分間最大雨量が 10mm 以上の短期間高強度降雨に おいて,浸透係数が大きくなる傾向があると言える.このことよりナコンナヨッ クサイトのような透水性の低い地盤においても,降雨強度が強いと浸透量は増加 すると考えられる.一方,浸透係数と累積雨量には相関は見られなかった.

4.1.2 プーケットサイトへの適用結果

まず,プーケットサイトにおいて 1 次元タンクモデル解析によって得られた 2012年の降雨に関しての最適パラメータとともに,そのヒストグラムをそれぞれ 表 4.4,図 4.9に示す.ここに示されるようにプーケットサイトにおいて,流出係 数は多少のばらつきはあるが,ほぼ 0.1 付近に分布していると言ってよい.なお, 流出係数に関しての値が大きくなっているものは,前述した浸透能の低下による ホートン型地表流の発生によると考えられる.一方,浸透係数は 0.1~0.3 付近ま で一様に分布した.

(a) パラメータの精度検証

ここで、得られたパラメータの精度を検証する.この最適パラメータセットの 中から 10月 17日と9月 12日の降雨波形、解析流出量波形、計測流出量波形、及 び流出量の計測値と解析値の相関を取ったものをそれぞれ図4.10、図4.11に示す. 同図より、計測値の流出量と解析値の流出量で非常に近い推移をすることから、 高い精度で計測値を表現できていることが分かる.ここで、降雨開始前の地盤状 態については、降雨開始前の地盤状態については、9月 12日の降雨は先行降雨が あり、10月 17日の降雨は先行降雨がなかったものとする.降雨開始前の地盤状 態によらず、再現性の高い解析値が得られていること.加えて流出量の計測値と 解析値の相関において、近似曲線の傾きが1に近いことから、このモデルの精度 の高さは、降雨開始前の地盤内の状態によらないと解釈される.以上より、対象 期間中の降雨についてそれぞれ求めた最適パラメータは、全て高い精度で再現で きていると考えられる.

(b) 同定したパラメータの特性について

次に得られたパラメータと降雨特性の相関について考える.10分間最大雨量と 流出係数の相関,累積雨量と流出係数の相関,及び10分間最大雨量と浸透係数の 相関,累積雨量と浸透係数の相関を取ると,それぞれ図4.12,図4.13に示すよう になった.

図 4.12 より,流出係数は 10 分間最大雨量及び累積降雨量とは相関がないという可能性が指摘される.また図 4.13 から累積雨量と浸透係数に相関は見られなかったが,10 分間最大雨量が大きい降雨ほど浸透係数も大きくなるということがいえる. つまり,短期間降雨強度が大きい降雨ほど斜面に効率よく浸透するということだ. ここで一般的には,前述したホートン流出の理論における表面流出量の発生機構より高強度降雨が浸透能を上回る場合,表面流出量が卓越し降雨量に占める浸透量の割合は小さくなるものと考えられている.しかしこの結果からは,高強度降雨が発生した場合,浸透割合が小さい場合においても,多くの水分量が浸透することを示唆している.

また,2012 年と2013 年の比較であるが,2013 年は2012 年の降雨に比べて全体的に流出係数が大きくなり,浸透係数は小さくなるという傾向が見られたが, 降雨特性の違いによる応答など,全体的には2012 年の降雨と同じ傾向を示したといえる.しかし,2013 年の降雨のみでは10 分間最大雨量,累積降雨ともに小さく降雨ごとの比較をすることが難しい.よって本研究では,主にプーケットサイトの議論において2012 年のデータを使用するものとし,2013 年のデータは2012 年におけるデータの10 分間最大雨量,累積降雨が小さい降雨におけるデータを補完するような位置づけで用いるものとする.

4.2 水収支分析

降雨中においては、斜面に降った降雨は式(4.1)に示すように3つの成分に分離 される.なお、前述したように、降雨中の蒸発散量は無視している.

$$Q_P = Q_R + Q_I + Q_S \tag{4.1}$$

ここに、*Q*_Pは降雨量、*Q*_Rは表面流出量、*Q*_Sは表層貯留量を表す.式(4.1)における表層貯留量の物理的意味は植生、地表面の凹凸、および地表下数センチの間隙

に保持される水量を表している.表層に貯留された水量は、やがて流出量および 浸透量の供給水量に置換される.また、降雨終了後には表層貯留量の一部が蒸発 散量の供給水量となる.タンクモデルにおいて、降雨量と表面流出量の差を斜面 への実流入量と定義しており、その実流入量と浸透量の差が表層貯留量となる.

4.2.1 ナコンナヨックの水収支

ナコンナヨックサイトにおけるタンクモデルによる計算結果のうち,図4.14 に 示す 2010 年 9 月 26 日の降雨に着目して,地表付近における水収支の詳細な分析 を行う.ここで,ナコンナヨックサイトにおける計算結果の比較を行うため,単 位面積あたりの強度で議論する.

同図に示すように、降雨中は表面流出量および表層貯留量の占める割合が大部 分で、浸透量が非常に少ないことが確認される.この結果はそれぞれナコンナヨ ックサイトが比較的間隙の大きい地盤であること、および比較的透水性の低い地 盤であることを示す結果であると解釈される.実際、当該斜面における透水係数 が 10⁻⁵~10⁻⁶ cm/sec で透水性の低い地盤であることから、図 4.14 に示す結果は妥 当であると推察される.しかし、降雨終了後に着目すると、長期間にわたって浸 透量が存在していることが確認される.これは表層貯留量として地表付近に一時 的に保持された雨水が時間をかけて浸透量および蒸発散量にまわる過程を示す結 果であると解釈される.浸透量の波形に着目すると、降雨波形との相関が見られ ないことが確認される.

また,表面流出量に着目する.降雨開始から表面流出量の立ち上がりまで 11 分程度の間,表面流出は発生しておらず,降雨は全て斜面に流入していることに なる.すなわち,降雨初期は降雨量がそのまま斜面への実流入量に置換され,こ の斜面流入量は,斜面内部への浸透量と表層貯留量に分類される.また,この 11 分間の降雨量の合計は9mmであった.これは降雨前の地盤状態が高サクションで あったことと欠損雨量を併せると,表層貯留量が地表付近における局所的飽和に 寄与していることが推察される.そして降雨開始から11分後表面流出が開始し, 降雨強度の増加とともに表面流出量は卓越する.ここで,全体的に降雨に占める 流出の割合が大きくなっていることにおいても,比較的透水性の低い地盤である ため浸透能が小さく,斜面内部に流入可能な水量が透水性の高い地盤に比べて少 ないためであると推察される.

4.2.2 プーケットの水収支

プーケットサイトにおけるタンクモデルによる計算結果のうち,図4.15 に示す 2012年10月17日の降雨に着目して,地表付近における水収支の詳細な分析を行う.なお,本降雨は短期間に高強度の降雨が集中している降雨である.なお,プ ーケットサイトにおいても計算結果の比較を行うため,単位面積あたりの流動量 で議論する.

まず表面流出量に着目する.図 4.15 において、ナコンナヨックサイトと同様に 降雨開始から4分程度の間、表面流出は発生せず、降雨は斜面に全て流入する. この4分間の降雨量の合計は2.5mmであった.そして降雨開始から5分後表面流 出が開始し、降雨強度の増加とともに表面流出量は増加する.ここでプーケット サイトでは浸透量についても同様に降雨強度の増加とともに増加する.また、降 雨初期においては表層貯留量が相当量であることが確認される.表面流出が降雨 初期から発生していること、および表面流出が発生するまでに地表付近で局所的 飽和が起こっていることを踏まえると、表層貯留量が地表付近における局所的飽 和を起こして表面流出が発生していると推察される.

次に、図 4.15 における無降雨期間に着目すると、表面流出量は降雨終了後すみ やかに 0 となるが、斜面内部への浸透が存在することが確認される.これは表層 貯留量の一部が、浸透量の供給水量に置換されているためである.表層貯留量の うち、浸透量の供給水量とならずに保持されている水量は蒸発散により消失する ものと推察される.浸透量の波形に着目すると、降雨波形との相関が見られない ことが確認される.また、表面流出量と浸透量の大小関係に着目すると、図 4.15 に示す全期間において、表面流出量と同程度、もしくはそれを上回る浸透量が発 生していることが確認される.これはプーケットサイトの透水性の高さを示す計 算結果であるといえる.

4.2.3 地盤特性の違いが雨水流出浸透特性に与える影響

ナコンナヨックサイトにおいては図 4.14に示す 2010年 9月 26日の計算結果に、 プーケットサイトにおいては図 4.15 に示す 2012 年 10 月 17 日の計算結果に着目 して,地盤特性の違いによる地表付近の雨水流出浸透挙動の相違を比較検討する.

(a) 浸透量

まず,降雨中における浸透量に着目すると,ピーク値においてプーケットサイトの浸透量の割合はそのときの降雨量の約 50%を占め、ナコンナヨックサイトの 浸透量の割合はそのときの降雨量の約 20%を占めていることが確認される.これ は、プーケットサイトはナコンナヨックサイトに比べて透水性が高いために浸透 量が多くなっていると解釈される.また飽和透水係数がプーケットサイトにおい ては 10⁻⁴~10⁻⁶m/sec で、ナコンナヨックサイトにおいては 10⁻⁷~10⁻⁸m/sec であり、 プーケットサイトはナコンナヨックサイトに比べて透水性が高いために浸透量が 多くなっていると考えれば、妥当な結果であると推察される.したがって透水性 は、時間あたりの浸透量を規定している要因の一つであると解釈される.なお、 この現象は 1 次元タンクモデルにおいては浸透係数のパラメータの違いによって 説明される.表 4.1、表 4.4 に示すように、ナコンナヨックサイトの浸透係数βは プーケットサイトに比べて非常に小さくなっている.

一方,降雨中における降雨に占める表層貯留量に着目すると,図4.14,図4.15 より明らかにナコンナヨックサイトの方が多いことが確認される.ここで,両斜 面の間隙率 nを比較すると,プーケットサイトにおいては 0.35~0.45 で,ナコン ナヨックサイトにおいては 0.51 であった.表層貯留量の物理的意味が植生,地表 面の凹凸,および地表下数センチの間隙に保持される水量であることを踏まえる と,間隙率が大きいナコンナヨックサイトの方が多いという結果は妥当であると 解釈される.したがって,間隙率は,表層貯留量の大小を規定する要因の一つで ある推察される.

次に無降雨期間における浸透量に着目すると、両斜面において無降雨期間にお いても浸透量が存在していることが確認される.しかしプーケットサイトに関し ては降雨中における浸透量は多いが、降雨終了後の浸透量の低減の速度が速く、 経過時間 50min の時点においては浸透量が 0 になっていることが確認される.一 方、ナコンナヨックサイトに関しては降雨中における浸透量は少ないが、降雨終 了後の浸透量の低減の速度が遅く、長時間浸透が続くことが確認される.この違 いについては二つの要因が考えられる.一つ目は、表層貯留量によるものである. つまり、ナコンナヨックサイトにおいては間隙率が大きく、表層貯留量が多いた め、浸透量に置換される水量が多いと解釈される.二つ目は、透水係数の違いを 表した浸透係数の差異である.ナコンナヨックサイトの浸透係数はプーケットサ

イトに比べて非常に小さくなっているため、降雨終了後においても雨水が時間を かけて深部に浸透しているわけである.

(b) 表面流出量

表面流出量に着目すると、 プーケットサイトは発生開始時間が早いが降雨に占 める表面流出量の割合が約30%と小さく、ナコンナヨックサイトにおいては発生 開 始 時 間 が 遅 い が い っ た ん 流 出 し 始 め る と 表 面 流 出 量 の 割 合 が 約 70% と 大 き く な ることが確認される.発生開始時間の違いについては間隙率の違いによるものが 考えられる. すなわち, ナコンナヨックサイトの方がプーケットサイトに比べて 間 隙 率 が 大 き く , 地 表 に 貯 留 す る こ と が で き る 水 量 が 多 い た め に 表 面 流 出 の 発 生 が遅くなっていると推察される. また, その量の違いについては透水性の違いに より説明することができる. つまり, プーケットサイトにおいては透水性が高い ために斜面内部に流入可能な水量が多いため,表面流出量が少ないと解釈される. なお、この現象は1次元タンクモデルにおいては浸透係数のパラメータの違いに よって説明され,表4.1,表4.4に示す.まず流出係数αについてはナコンナヨッ クサイトの方が大きいがその差異は微小である.次に、浸透係数に着目すると、 ナコンナヨックサイトの浸透係数がプーケットサイトに比べて非常に小さくなっ ている. さらに, 流出孔までの高さ H(欠損雨量)を比較すると, プーケットサイ トが 2.7mm であるのに対して, ナコンナヨックサイトが 9.0mm と 3 倍以上高くな っている.したがって、ナコンナヨックサイトにおいては、水がタンクから排水 されにくく、タンク貯留高がプーケットサイトに比べて高くなるために降雨に占 める表面流出量の割合も大きくなっていると想定される.

以上の (a), (b)より, プーケットサイトおよびナコンナヨックサイトの地表付 近における雨水流出浸透挙動は以下のように説明することができる.

まず,透水性が高く間隙率が小さいプーケットサイトにおいては,降雨中にお ける単位時間あたりの浸透量は多く,浸透速度も速い.しかし,間隙率の大きい 地盤に比べるとやはり表層貯留量の絶対量が少ない.そのため,降雨終了後の浸 透量の供給水量が少なく,浸透量の低減は速いといえる.ただし,浸透量の低減 が速いことに透水性の高さも寄与している点に留意されたい.すなわち,単位時 間あたりに浸透可能な量が多いため,地表付近に保持される水量が少なくなって いる.また表面流出量に着目すると,透水性が高いため浸透能が高い.その影響

で表面流出量が少なくなっていると解釈される.

一方,透水性が低く間隙率が大きいナコンナヨックサイトにおいては,降雨中 における単位時間あたりの浸透量は少なく,浸透速度も遅い.しかし,間隙率が 大きいため表層貯留量が多い.そのため,降雨終了後の浸透量の供給水量が多い ために,降雨終了後も長時間浸透が存在する.すなわち,単位時間あたりの浸透 量は少ないが,浸透が長時間続くと解釈される.また,表面流出量に着目すると, 透水性が低いために浸透能が低く,表面流出量が多くなっているといえる.

4.3 表層貯留量に関する考察

4.3.1 降雨特性が雨水浸透特性に与える影響

降雨特性の違いが地表付近の雨水流出浸透特性に与える影響において議論する際に、表層貯留量が重要な意味を持つと考えた.ここで、表層貯留量は降雨によって変わる絶対量であるので、統一的な議論をするために、表層貯留量を累積降雨量で割ることにより表層貯留量比(=Qs/R)を設定した.

(a) 降雨特性が雨水浸透特性に与える影響

まず、プーケットにおける降雨特性と表層貯留量比をまとめたものを表 4.5 に 示し、表層貯留量比と累積降雨量との相関、表層貯留量比と 10 分間最大雨量との 相関をそれぞれ図 4.16、図 4.17 に示す.図 4.16 に示されるように表層貯留量比 と累積雨量とは相関が見られなかった.図 4.17 より、表層貯留量比と 10 分間最 大雨量に関しては、10 分間最大雨量が大きくなるほど表層貯留量比は小さくなっ ていくという相関が見られた.ここで、10 分間最大雨量が大きくなるほど浸透係 数も大きくなることから、高強度降雨が発生した場合にも多くの水分量が斜面内 に浸透することを示した.

つまり,これらから仮説として以下のことが言える.10分間最大雨量が大きく, 表層貯留量比が小さい降雨の場合,その斜面流入量の多くは地表面に表層貯留量 として保持されることなく地中に浸透する.反対に10分間最大雨量が小さく,表 層貯留量比が大きい降雨の場合,その斜面流入量の多くは地表面に表層貯留量と して保持される.ここで,この10分間最大雨量の大小,および表層貯留量比の大 小それぞれの場合において実際に起こる現象を原位置の体積含水率の推移から推

察,比較し、この仮説と合うかどうかを検証した.

(b) 原位置の体積含水率との比較

ここでは 10 分間最大雨量,および表層貯留量比の違いが地表面における雨水 浸透挙動に与える影響を顕著にするため,図4.16,図4.17に示すプーケットサイ トにおける 2 つの降雨を用いる. 10 分間最大雨量 7.0, Qs/R=0.615 である 11 月 16日,10分間最大雨量 12.5.Qs/R=0.203 である 11月 21日の 2 つである.ここで, プーケットサイトに着目したのは、ナコンナヨックサイトに比べて透水性が大き く,斜面に流入する水分量が大きいためである.まず,それぞれに関して降雨量 及び法尻 GL-0.1m, 法尻 GL-0.2m における体積含水率の推移を描いたものを図 4.18, 図 4.19 に示す.図 4.18 に示す,表層貯留量の影響が大きいと考えられる 11 月 16日に着目する. 同図より, 11月 16日においては法尻 GL-0.1mの体積含水率 が 23 時頃に上昇した後, 25 分程度の遅れを伴って法尻 GL-0.2mの体積含水率が 上昇している. 表層貯留量比が大きいことと併せて考えると, この法尻 GL-0.2m の体積含水率の上昇の時間遅れは,法尻 GL-0.1m 付近に存在する表層貯留量の影 響ではないかと推察される. また, 降雨波形の特徴として 22時 38分頃に降雨の 第一波があり, 法尻 GL-0.2mの体積含水率が上昇を始めた時間と同じ 23時 25分 頃に第二波がある.これらのことから、表層貯留量は23時からの25分間で徐々 に、降雨の第一波に起因する一時的な飽和状態に近づいた。そしてそこに降雨の 第二波があったために一気に飽和状態に達し、表層貯留量として保持できなくな った水分量が浸透にまわったために、法尻GL-0.2mの体積含水率は5分程度で急 激に上昇したと推察できる.以上のことからこの時間差は表層貯留量が存在する ことの影響であると言えるだろう.

次に図 4.19 に示す,表層貯留量の影響が小さいと考えられる 11 月 21 日に着目 する. 同図より, 11 月 21 日においては法尻 GL-0.1mの体積含水率が 23 時 13 分 頃に上昇した後, 2 分程度の遅れを伴ってほぼ同時に法尻 GL-0.2mの体積含水率 も上昇している. 11 月 21 日においては上記のように 11 月 16 日と全く異なる挙 動をするが,このときの表層貯留量比が Qs/R=0.203 であることと併せると,この 挙動は表層貯留量が存在しないことの影響であると言えるだろう.

以上から、10分間最大雨量および表層貯留量比は、高い精度で地表付近の体積 含水率の推移に与える影響を示していると考えられる.

4.3.2 原位置 SWCC との比較

以上より,透水性が低く間隙率が大きいほど,また 10 分間最大雨量が小さい ほど,表層貯留量が発生する傾向があるといえる.ここで表層貯留量に着目して 原位置 SWCC を比較することで,その相関関係を推察する.

まず、Qs/R=0.277 である9月18日、およびQs/R=0.353 である9月26日の2 つの降雨をみる.それぞれの降雨に関して中腹GL-0.2m、中腹GL-0.6m、法尻 GL-0.2m、および法尻GL-0.6mでの原位置SWCCを描いた.それぞれ図4.20、図 4.21、図4.22、図4.23 に示す.

図 4.20 より, 中腹 GL-0.2m 原位置 SWCC に関して述べる. 9月 18日, 9月 26 日ともに, 吸水過程において, まず体積含水率一定に保った状態で間隙水圧が上 昇し, 間隙水圧が 0[kPa]に近い領域に達すると体積含水率が上昇するというよう に明確なインク瓶効果を示す

次に図 4.21 に示す中腹 GL-0.6m 原位置 SWCC に関して述べる.9月 18日,9
月 26日ともに明確なヒステリシスが生じず,インク瓶効果が確認できない.なお,9月 12日に関しては中腹 GL-0.6mの体積含水率のデータは計測していない.

加えて図 4.22 に示す法尻 GL-0.2m 原位置 SWCC に関して述べる.9月 18日,9 月 26日ともに吸水過程において,まず間隙水圧一定に保った状態で体積含水率が 上昇し,その後間隙水圧が上昇するというような挙動を示す.ここで,9月 18日, 9月 26日それぞれに関して,法尻 GL-0.2m における体積含水率および間隙水圧の 推移を図 4.24,図 4.25 に示す.

図 4.24(b)から、間隙水圧が上昇し始めてから上昇が終わるまでの時間は 28 分間である.一方図 4.24(a)から、体積含水率が上昇し始めてから上昇が終わるまで の時間は 2 分間ほどである.また、図 4.25(b)から、間隙水圧が上昇し始めてから 上昇が終わるまでの時間は 20 分間である.一方図 4.25(a)から、体積含水率が上 昇し始めてから上昇が終わるまでの時間は 5 分間ほどである.これらのことから、 最初に間隙水圧一定に保った状態で体積含水率が上昇した挙動について、計測機 器の誤差であるという可能性が考えられる.さらに、この要因として 2 つのこと が考えられる.1つ目は土壌水分計の設置状況の違いである.中腹部では植生の 下部に設置されているのに対して、法尻部では裸地の下部に設置されている.す なわち裸地の下部の方が植生に覆われた地点よりも雨水が浸透しやすいのだ.2 つ目は土壌水分計とテンシオメータの計測原理の違いである.土壌水分計は点で

の値を計測するのに対し、テンシオメータは面での値を計測するので、土壌水分 計は局部的な水分量の変動に反応しやすいのだ.このことを踏まえると、法尻 GL-0.2m 原位置 SWCC においても、9月 18日、9月 26日ともにインク瓶効果が 発生していると言ってよいと推察する.

最後に図 4.23 に示す法尻 GL-0.6m 原位置 SWCC に関して述べる.9月 18日,9 月 26日ともに明確なインク瓶効果を示す.

以上より、中腹部に関しては深度の違いで描く原位置 SWCC の経路に差がある ことが確認された. すなわち GL-0.2m の地表付近ではインク瓶効果が見られ、 GL-0.6m の地中では見られなかった.これは表層貯留量にも同様のことが言える. このことから、インク瓶効果は表層貯留量に起因しているという可能性が推察さ れる.しかし、法尻部に関しては、GL-0.2m、GL-0.6m ともにインク瓶効果が見 られた.これは図 4.23 より、中腹部に比べ法尻部の方が浸透する時間が早い.こ のことから法尻部ではインク瓶効果が見られる深度の範囲が広くなったと推察さ れる.

ここで、インク瓶効果は表層貯留量に起因しているという可能性に裏付けを加 えるために表層貯留量とインク瓶効果の関係に着目して議論する.9月18日、9 月26日のそれぞれの降雨に関して、水収支と合わせた中腹 GL-0.2m における体 積含水率および間隙水圧の推移を図 4.26、図 4.27 に示す.

図 4.26 より, Qs/R=0.277 である 9 月 18 日に着目する. 間隙水圧の上昇が始ま ってから 13 分ほどの時間遅れを伴って体積含水率が上昇した.また,降雨開始後 表層貯留量は増加するが,間隙水圧の上昇と同時に表層貯留量は減少した.よっ て,表層貯留量が存在することにより体積含水率と間隙水圧の上昇に時間差が生 じ,その結果インク瓶効果を引き起こすという理論のもとでは,図 4.20 に示した 原位置 SWCC と比べても整合性があるといえる.

図 4.27 より, Qs/R=0.353 である 9 月 26 日に着目する. 間隙水圧の上昇が始ま ってから 8 分ほどの時間遅れを伴って体積含水率が上昇した. また, 9 月 18 日と 同様に降雨開始後表層貯留量は増加するが, 間隙水圧の上昇と同時に表層貯留量 は減少した. よって 9 月 26 日に関しても, 9 月 18 日の場合と同様に図 4.20 に示 した原位置 SWCC と比べても整合性があるといえる.

また,9月18日,9月26日ともに間隙水圧が上昇を始めてからピーク値に到 達するまで10分ほどであった.しかし体積含水率に関しては,9月18日は上昇

を始めてからピーク値に到達するまで 15 分であるのに対して,9月 26 日は 35 分 であった.初期サクションの負圧は9月 18日の方が大きいことと併せて考えると, これは表層貯留量の影響であることが推察される.すなわち,9月 26日は表層貯 留量比として一時的に保持されている水分量が多いため,その保持された分の浸 透が終わるまでの時間が9月 18日よりも長いと考えられる.そして,それが体積 含水率の上昇時間の差であると推察される.

以上より、インク瓶効果は表層貯留量が存在する影響であり、同一の現象をそ れぞれ表していると推察される.

このことから、体積含水率一定に保った状態で間隙水圧が上昇した後に、時間 差を伴って体積含水率が増加するというインク瓶効果は表層貯留量の影響である と推察される.また、表層貯留量比という指標は非常に高い精度で、降雨特性及 び表層貯留量が地表付近の雨水浸透特性に与える影響を示していると推察される.

4.3.3 豪雨に伴う斜面崩壊

斜面を構成する地質や土質の浸透現象の差異により,斜面の破壊形態が異なる といわれている¹⁵⁾. すなわち,表面流が発生する場合は表面浸食が生じ,表層土 内に飽和側方流が発生する場合は表層崩壊が生じる.また,水が深部に浸透し深 部飽和流が発生する場合は深層崩壊が生じる.以上のようにそれぞれ卓越した破 壊形態をとる傾向にある.

表面浸食は短期間集中豪雨の際に,表面流出に伴う掃流力や雨滴の衝撃・分散 作用による土壌粒団の破壊等により発生するといわれている.

また,表層崩壊および深層崩壊は間隙水圧の発生,せん断強度の低下,および 自重の増加が複合的に起こることにより発生するといわれており,この崩壊機構 の違いは斜面の透水性に起因すると推察される

本研究においては、斜面表層領域における雨水流出浸透現象に関する原位置計 測および1次元タンクモデルを用いた解析結果をもとに、斜面の地盤特性の相違 が破壊形態に及ぼす影響について検討する.

まず, ナコンナヨックサイトにおいては透水性が小さく, 短期間集中豪雨時にお いても斜面内に水分量はゆっくりとしか浸透しないと考えられる. このことと当 サイトは非常に大きな斜面であることから, 斜面上部からの浸透流が側方流とし て流れ徐々に法尻部に溜まり局地的に水分量が多くなった. また深層まで到達し

た浸透流により深部の岩塊の不連続面に静水圧を超える過剰間隙水圧が発生し上向きの飽和浸透流が発生する.これにより深層崩壊の危険性が推察される.

一方、プーケットサイトにおいてはナコンナヨックサイトよりも透水性が高く、 短期間集中豪雨時においても斜面内に水分量が多く入りやすい.また、このこと に加えインク瓶効果が生じている斜面表層付近において表層貯留量が存在するこ とから、斜面表層付近の間隙空気の閉塞に伴う間隙空気圧の増加が生じる.これ により表層崩壊の危険性が推察される.また、斜面表層付近の間隙空気圧の増加 の一因として、プーケットサイトは不均質な自然斜面であり、岩塊が間隙空気を 局所的に閉塞させたことが推察される.

以上より, 短期間集中豪雨時の斜面の崩壊機構は, それぞれの斜面の地盤特性 によって変わってくるものであると考えられる.

第5章 まとめと今後の課題

本研究では,第2章において,原位置計測の概要と結果をプーケット・ナコン ナヨックの2サイトに関してそれぞれ述べ,斜面の特性を把握した.その概要を 簡潔に示す.ナコンナヨックサイトは間隙率が比較的大きく,かつ比較的低透水 性で表面流出量が卓越しやすい.プーケットサイトは間隙率が比較的小さく,か つ比較的高透水性で浸透量が卓越しやすい.

第4章において,第3章で述べた1次元タンクモデルの適用結果と第2章で述 べた原位置計測結果から,地盤特性や降雨特性の違いにおける,表層貯留量が斜 面表層部に与える影響について水収支から考察した.また,体積含水率及び水分 特性曲線との比較検討において,より詳細な分析を試みた.以下に第4章におい ての要点ごとの結論を簡潔に述べる.

まず、カルマンフィルタにより得られたパラメータの傾向を示す.2 サイトと もに、流出係数は降雨特性とは相関かない.しかし浸透係数においては2サイト ともに 10 分間最大雨量が大きくなるほど、浸透係数は大きくなるという相関 が見られた.なお、累積雨量と浸透係数に関しては相関がない.

次に、1次元タンクモデルの適用結果と原位置計測結果から得られた2サイト の概要を示す.透水性が高く間隙率が小さいプーケットサイトにおいては、降雨 中における単位時間あたりの浸透量は多く、浸透速度も速い.しかし、間隙率の 大きい地盤に比べるとやはり表層貯留量の絶対量が少ない.そのため、降雨終了 後の浸透量の供給水量が少なく、浸透量の低減は速いといえる.また表面流出量 に着目すると、透水性が高いため浸透能が高い.その影響で表面流出量が少なく なっていると解釈される.一方、透水性が低く間隙率が大きいナコンナヨックサ イトにおいては、降雨中における単位時間あたりの浸透量は少なく、浸透速度も 遅い.しかし、間隙率が大きいため表層貯留量が多い.そのため、降雨終了後の 浸透量の供給水量が多いために、降雨終了後も長時間浸透が存在する.また、表 面流出量に着目すると、透水性が低いために浸透能が低く、表面流出量が多くな っているといえる.

また,表層貯留量が斜面表層部に与える影響について.10分間最大雨量の大きい降雨の場合,その斜面流入量の多くは地表面に表層貯留量として保持される ことなく地中に浸透する.一方10分間最大雨量の小さい降雨の場合,その斜面流

入量の多くは地表面に表層貯留量として保持される.ここで表層貯留量と累積雨 量との相対量である表層貯留比を設定し,降雨特性の違いが斜面に与える影響を 原位置に関する体積含水率の推移,および SWCC から推察した.その結果,斜面 表層部で生じるインク瓶効果は表層貯留量の影響であり,表層付近に雨水が一時 的に保持されるという同一の現象を表していることを示した.そして,斜面表層 領域における雨水流出浸透現象に関する原位置計測および1次元タンクモデルを 用いた解析結果をもとに,斜面の地盤特性の相違が破壊形態に及ぼす影響につい て検討したところ,次のような結論に達した.短期間集中豪雨時において,低透 水性の斜面では表層崩壊は生じないが,深層まで達した浸透流に伴う過剰間隙水 圧の発生により深層崩壊の危険性があると推察された.一方,高透水性の斜面で は地下水面まで浸潤前線が到達して間隙水圧が増加し深層崩壊が発生する前に, 表層貯留量の影響により間隙空気圧が増加し表層崩壊の危険性があると推察され た.

今後の課題としては、1次元タンクモデルの適用結果において. プーケットサ イトにおける解析結果の方が、ナコンナヨックサイトにおける解析結果に比べ、 精度が高い. これは地質や様々な環境要因が考えられるが、最も大きな要因はそ の斜面の規模であると考える. つまり、ナコンナヨックは斜面が大きいために法 尻部まで雨水が流れてくるまでに時間がかかるが、一つのタンクではその遅れを 表現することが出来ないと推察される. このことから規模の大きい斜面に対する 解析精度改善の余地があると推察される.

参考文献

- 1)Jotisankasa, A., Porlila, W., Soralump, S. and Mairiang, W.: Development of a low cost miniature tensiometer and its applications, Proceedings of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia 2007), pp.475-480, 2007
- 2) 杉井俊夫,竹下裕二:不飽和地盤の浸透特性の評価方法,土と基礎,55(9),
 pp.20-22,2007
- 3)Nisigaki, M.: Research on Behavior of Groundwater and Its Application to Foundation Engineering, Dissertation of Kyoto University, 1979.
- 4)大津宏康,堀田洋平,高橋健二,中村一樹,新村知也:熱帯性豪雨(スコール) に起因する斜面降雨浸透に関する原位置モニタリング,地盤の環境・計測技術 に関するシンポジウム 2009 論文集, pp.1-6, 2009.
- 5)Ohtsu, H., Hotta, Y., Takahashi, K. and Nakamura, K.: A Study on Applicability of Modified Multi-Tank Model for Unsaturated Soil Slope, Proceedings of EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering 2008, pp.184-191, 2008.
- 6)Hotta Yohei: Evaluation of Unsaturated Soil Slope Stability against Heavy Rainfall Using Modified Multi-Tank Model System, Master's thesis of Kyoto University, 2009.
- 7) T. Suwanishwong, T., Ohtsu, H. and Takahashi, K.: Application of Kalman filter algorithm in Parameters identification of modified Multi Tank Model system, Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, pp.113-121, 2008.
- 8) 川合良治:不飽和領域における拡張型マルチタンクモデルのパラメータ同定 手法に関する研究
- 9) 古賀博久:豪雨時の斜面表層領域における雨水流出浸透特性に関する研究
- 10) Horton, E. R.: An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity, Soil Sci. Soc. Am., Proc., 5, pp.399-417, 1940.
- 11)小峯秀雄,安原一哉,村上哲,内田佳子:各種土質材料の水分特性曲線に着目した集中豪雨による河川堤防や河岸の脆弱性簡易評価,地盤工学会誌, Vol.57, No.4, pp.22-25, 2009.
- 12) Nipawan Chaleiwchalard : Landslide Risk Evaluation Caused by Torrential Rainfall, Doctor's thesis of Kyoto University, 2012.

- 13) 川合良治:原位置計測に基づく斜面への降雨浸透特性に関する研究
- 14) 菅原正巳: 水文学講座流出解析法, 共立出版, pp.206-211, 1972.
- 15) 土屋智:深層崩壊とその発生場の特徴,土砂災害警戒避難システムに関する 研究一土砂災害予測グループ 平成 11 年度研究報告一,砂防学会,2000.
謝辞

本論文を作成するにあたり、お世話になった方々に感謝の意を表します.

まず,京都大学大学院工学研究科教授・大津宏康先生には素晴らしい研究環境 を提供していただくとともに,ご多忙の中,時に厳しくも常に温かいご指導をし て頂きましたことを大変感謝しております.また,研究に対する姿勢や生活面で の話など,参考になるお話しを数多くして頂き,研究を通して精進するという気 持ちを持つことができました.

京都大学工学研究科・乾徹准教授には,副査を務めて頂き,的確なご指摘を頂 きました.心から感謝致します.

京都大学大学院工学研究科准教授・塩谷智基先生には、学生との交流を積極的 に図っていただき、また、日ごろから多くの励ましの御言葉を頂きましたことを 大変感謝いたします.

水文技術コンサルタント株式会社・高橋健二氏,応用地質株式会社・矢部満氏 には、本研究に関する会議の際に、大変勉強をさせて頂き、深く感謝致します.

大八木智子秘書には、日々の研究生活を様々な面でサポートして頂き. 心から お礼申し上げます.

また,大津研究室の諸先輩方ならびに同回生の方々のおかげで,非常に有意義 な研究生活を送ることができました.特に研究面では益田さん,池永さんに非常 に親切にして頂きましたことを深く感謝いたします.

最後に、本研究だけでなく、何不自由なく大学で勉強できるというすばらしい 環境を与えてくださり、生活面でも常に温かく見守ってくれた家族に心から感謝 いたします.

33

表2.1 当該斜面の力学特性

斜面傾斜角[°]	27.65	間隙比	1.05
土の単位体積重量 [kN/m³]	17.66	有効粘着力 [kPa]	14.5
土粒子密度 [g/cm ³]	2.71	有効内部摩擦角[°]	33.9
乾燥密度 [g/cm ³]	1.33		

表2.2 降雨の分類

時間雨量(mm/hour)	予報用語	人の受けるイメージ	災害発生状況
10~20	やや強い雨	ザーザーと降る	この程度の雨でも長く続く時は注意が必要
20~30	強い雨	どしゃ降り	側溝や下水, 小さな川があふれ, 小規模の がけ崩れが始まる
30~50	激しい雨	バケツをひっくり返したよう に降る	山崩れ・崖崩れが起きやすくなり危険地帯 では避難の準備が必要
50~80	非常に激しい雨	滝のように降る(ゴーゴー と降り続く)	・都市部では地下室や地下街に雨水が流れ 込む場合がある.・土石流が起こりやす い.・多くの災害が発生する.
80~	猛烈な雨	息苦しくなるような圧迫感 がある. 恐怖を感ずる	雨による大規模な災害の発生するおそれが 強く, 厳重な警戒が必要

表2.3 飽和透水係数

■ ボアホールパーミアメータ法	法肩部(井戸深度GL-2.92m)	6.79×10 ⁻⁴ cm/s	
	法尻部(井戸深度GL-2.26m)	5.48×10 ⁻⁴ cm/s	
	法肩部	1.51×10 ⁻² cm/s	
表層浸透実験	中腹部1	$7.22 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$	
	中腹部2	1.74×10^{-3} cm/s	
	法尻部	1.15×10 ⁻² cm/s	

表4.1 最適パラメータ(ナコンナヨック)

降雨開始日	10分間最大	累積雨量(r	流出係数 α	浸透係数β
2010/5/12	16.5	30.0	0.1636	0.0047
2010/5/22	7.00	26.0	0.1629	0.0005
2010/5/24	7.50	31.0	0.1629	0.0005
2010/5/25	9.00	22.5	0.4300	0.0008
2010/5/27	9.00	38.5	0.1629	0.0005
2010/6/3	12.0	59.5	0.1629	0.0005
2010/6/6	8.00	23.0	0.1629	0.0005
2010/9/2	12.5	32.5	0.2830	0.0026
2010/9/7	15.5	54.5	0.3523	0.0012
2010/9/18	10.5	16.0	0.2830	0.0026
2010/9/26	9.00	38.0	0.2227	0.0142

表4.2 立ち上がり

降雨開始日	10分間最ナ	累積雨量(r	流出係数 α	浸透係数β
2010/5/12	16.5	30.0	0.554	0.070
2010/5/22	7.00	26.0	0.283	0.003
2010/5/24	7.50	31.0	0.527	0.019
2010/5/25	9.00	22.5	0.676	0.005
2010/5/27	9.00	38.5	0.290	0.026
2010/6/3	12.0	59.5	0.541	0.045
2010/6/6	8.00	23.0	0.111	0.004
2010/9/2	12.5	32.5	0.352	0.001
2010/9/7	15.5	54.5	0.352	0.001
2010/9/18	10.5	16.0	0.593	0.017
2010/9/26	9.00	38.0	0.634	0.028

表4.3 先行降雨の影響

日時(2010年)	前降雨終了時か らの経過時間
	(時間)
5/12 13:40-14:00	212
5/22 6:10-8:40	234
5/24 23:30-5/25 2:00	41.0
5/25 16:40-17:20	14.7
5/27 20:40-5/28 0:10	44.2
6/3 23:40-6/4 1:20	78.3
6/4 22:10-6/5 3:00	20.8
6/6 13:20-14:20	34.3
6/20 21:40-23:50	119
9/2 20:30-9/3 2:50	17.2
9/18 10:20-10:50	19.8
9/20 4:20-5:20	41.5
9/26 12:30-14:30	151

表4.4 最適パラメータ(プーケット)

降雨開始日	10分間最大雨	累積雨量(mm	流出係数 a	浸透係数β
2012/3/19 10:20	17.5	44.0	0.107	0.231
2012/4/4 7:50	11.5	31.0	0.105	0.213
2012/4/19 0:10	13.5	25.0	0.110	0.268
2012/4/27 3:10	15.0	45.5	0.113	0.295
2012/6/6 6:10	8.50	77.0	0.098	0.121
2012/6/7 4:40	9.50	144	0.097	0.122
2012/7/3 17:10	14.0	49.5	0.109	0.249
2012/7/4 1:20	8.50	77.5	0.073	0.134
2012/7/7 10:20	14.5	54.0	0.104	0.194
2012/7/8 9:30	14.0	59.0	0.170	0.246
2012/8/22 3:00	17.5	97.5	0.103	0.276
2012/8/23 15:10	11.5	42.0	0.201	0.235
2012/8/27 13:20	10.5	58.0	0.104	0.194
2012/9/12 23:00	8.00	30.0	0.096	0.103
2012/9/18 23:50	10.0	30.0	0.124	0.114
2012/9/26 5:30	10.0	82.0	0.320	0.133
2012/10/13 11:30	8.00	31.5	0.098	0.130
2012/10/17 22:20	15.0	27.5	0.193	0.183
2012/11/16 22:30	7.00	28.5	0.094	0.085
2012/11/21 23:10	12.5	45.5	0.101	0.158
2012/11/24 10:30	4.50	37.5	0.118	0.061
2013/9/29 8:50	5.00	22.5	0.146	0.072
2013/10/3 2:00	6.50	71.5	0.418	0.072
2013/10/4 11:10:00	10.5	18.5	0.454	0.055
2013/10/42 13:20:00	4.50	30.5	0.515	0.042
2013/10/19 2:40	10.0	45.0	0.251	0.144
2013/10/26 21:50:00	8.00	.41.5	0.239	0.087
2013/10/262 23:00:00	7.00	40.5	0.167	0.078
2013/10/28 2:00	10.0	21.5	0.153	0.124
2013/11/3 10:20	10.0	21.5	0.098	0.121

表4.5 表層貯留量比

降雨開始日	10分間最大雨	累積雨量(mm	Qs/R
2012/3/19 10:20	17.5	44.0	0.185
2012/4/4 7:50	11.5	31.0	0.306
2012/4/19 0:10	13.5	25.0	0.211
2012/4/27 3:10	15.0	45.5	0.178
2012/6/6 6:10	8.50	77.0	0.502
2012/6/7 4:40	9.50	144	0.323
2012/7/3 17:10	14.0	49.5	0.291
2012/7/4 1:20	8.50	77.5	0.560
2012/7/7 10:20	14.5	54.0	0.192
2012/7/8 9:30	14.0	59.0	0.299
2012/8/22 3:00	17.5	97.5	0.162
2012/8/23 15:10	11.5	42.0	0.381
2012/8/27 13:20	10.5	58.0	0.285
2012/9/12 23:00	8.00	30.0	0.409
2012/9/18 23:50	10.0	30.0	0.277
2012/9/26 5:30	10.0	82.0	0.355
2012/10/13 11:30	8.00	31.5	0.305
2012/10/17 22:20	15.0	27.5	0.195
2012/11/16 22:30	7.00	28.5	0.616
2012/11/21 23:10	12.5	45.5	0.204
2012/11/24 10:30	4.50	37.5	0.478
2013/9/29 8:50	5.00	22.5	0.535
2013/10/3 2:00	6.50	71.5	0.405
2013/10/4 11:10:00	10.5	18.5	0.292
2013/10/4② 13:20:00	4.50	30.5	0.393
2013/10/19 2:40	10.0	45.0	0.494
2013/10/26① 21:50:00	8.00	.41.5	0.365
2013/10/26② 23:00:00	7.00	40.5	0.381
2013/10/28 2:00	10.0	21.5	0.395
2013/11/3 10:20	10.0	21.5	0.287

・1時間降水量の年間発生回数
 ・全国約1300地点のアメダスより集計
 ・1000地点あたりの回数としている

明瞭な変化傾向あり(10年あたり21.5回増加、1976年から2013年のデータを使用) 気象庁 1000地点あたりの観測回数 .03 年

[アメダス]1時間降水量50ミリ以上の年間観測回数

(引用: 気象庁HP)

図 1.1 1時間降水量50 mm以上の年間発生回数(1000地点あたり)

- ・1時間降水量の年間発生回数
 ・全国約1300地点のアメダスより集計
- ・1000地点あたりの回数としている



[アメダス]1時間降水量80ミリ以上の年間観測回数

(引用: 気象庁HP)

図 1.2 1時間降水量80 mm以上の年間発生回数(1000地点あたり)



図1.3 ホートン流出の発生機構



図1.4 ホートン流出の発生機構



図1.5 SWCCの概要



図2.1 斜面断面図



図2.2 斜面平面図



図2.3 降雨の分析(ナコンナヨック)



図2.4 ナコンナヨック2010年9月7日



図2.5 ナコンナヨック2010年6月20日



図2.6 斜面断面図



図2.7 斜面平面図



図2.8 降雨の分析(プーケット)



図2.9 プーケット2012年10月17日





図3.1 1次元タンクモデル



図 3.2 カルマンフィルタ

	水位の差の t=1~7の 合計	水位の差の t=1~7の中 の最大値	合計の偏差値 (A)	最大値の偏差値 (B)	偏差値の 和
パラメータ セット 1	x_1	<i>Y</i> ₁	$\frac{x_1 - \mu_s}{\sigma_s} \times 10 + 50$	$\frac{y_1 - \mu_m}{\sigma_m} \times 10 + 50$	$A_1 + B_1$
パラメータ セット2	<i>x</i> ₂	<i>y</i> ₂	$\frac{x_2 - \mu_s}{\sigma_s} \times 10 + 50$	$\frac{y_2 - \mu_m}{\sigma_m} \times 10 + 50$	$A_{2} + B_{2}$
		÷	•	•	÷
パラメータ セットi	X _i	${\mathcal{Y}}_i$	$\frac{x_i - \mu_s}{\sigma_s} \times 10 + 50$	$\frac{y_i - \mu_m}{\sigma_m} \times 10 + 50$	$A_i + B_i$
	•••	:			:
平均	μ_{s}	μ_{m}			
標準偏差	σ_{s}	$\sigma_{_m}$			

偏差値の和が最小となる時の

パラメータセットが最適パラメータ

図 3.3 誤差計算







図4.1 最適パラメータのヒストグラム (ナコンナヨック)















<u>6月4日</u>



<u>9月2日</u>





<u>6月6日</u>



<u>9月18日</u>



図4.4 低サクション降雨まとめ





図4.5 5月24日(立ち上がり)





図4.6 9月26日(立ち上がり)





図4.7 流出係数と降雨特性の相関





図4.8 浸透係数と降雨特性の相関


図4.9 最適パラメータのヒストグラム (プーケット)





図4.10 最適パラメータセットにおける 流出量の解析値(10月17日)





図4.11 最適パラメータセットにおける 流出量の解析値(9月12日)





図4.12 流出係数αと降雨特性の相関





図4.13 浸透係数βと降雨特性の相関



図4.14 ナコンナヨック水収支 (2010年9月26日)



図4.15 プーケット水収支 (2012年10月17日)



図4.16 表層貯留量比(Qs/R)と累積降雨量の相関



図4.17 表層貯留量比(Qs/R)と10分間最大雨量の相関



図4.18 体積含水率の推移 (11月16日)



図4.19 体積含水率の推移 (11月21日)



図4.20 中腹GL-0.2m原位置SWCC



図4.21 中腹GL-0.6m原位置SWCC



図4.22 法尻GL-0.2m原位置SWCC



図4.23 法尻GL-0.6m原位置SWCC

図4.24(a)



図4.24(b)



図4.24 法尻GL-0.2m(9月18日)

図4.25(a)





図4.25(b)



図4.25 法尻GL-0.2m(9月26日)



図4.26 中腹GL-0.2m(9月18日)





図4.27 中腹GL-0.2m(9月26日)