

## 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>	<b>氏 名</b> （ふりがな）		<b>所 属</b>		<b>役 職</b>
	酒匂 一成（さこう かずなり）		鹿児島大学学術研究院 理工学域工学系		准教授
<b>②研究 テーマ</b>	名称	シラス堤防の浸透および越水に対する安定性に関する検討			
	政策 領域	[分野] 地域課題分野（河川）		融合 技術	（リモートセンシング、非破壊 検査、認知行動学 等）
		[公募課題]			
<b>③研究経費</b> （単位：万円）	平成28年度	平成29年度	平成30年度	総 合 計	
※端数切り捨て。	140万円	182万円	168万円	491万円	
<b>④研究者氏名</b>	（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）				
氏 名	所属・役職（※平成31年3月31日現在）				
齋田 倫範	鹿児島大学学術研究院理工学域工学系・准教授				
<b>⑤研究の目的・目標</b>	（申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）				
<p>南九州地域の地盤は、その大半がシラスに覆われていることから、河川堤防の築造材料としてシラスが使用されている。シラスは、土粒子密度が低く、水の浸透に対して浸食されやすい特徴を持っており、過去にも堤防ののり面崩壊や漏水などの被害が生じている。現在、大隅河川国道事務所において、川表側・天端の遮水や川裏側のドレーン工による堤防強化が実施されているところである。今後は、その効果および平成27年の鬼怒川の越水決壊のような事象などに対する“ねばり強い”堤防についてシラスの土質特性を踏まえた河川堤防について検討していく必要がある。</p> <p>（目的）</p> <p>シラス堤防の被災事例、被災メカニズムを把握するとともに、実施されている堤防強化策の効果、シラス堤防の浸透や越水に対するシラス堤防の安定性について検討し、シラス堤防の技術的課題について知見を高めることを目的とする。</p> <p>（調査・研究内容）</p> <p>(1)シラス堤防における過去の被災事例調査と被災メカニズムの検討  (2)シラス堤防の浸透や越水に対する安定性に関する室内土槽実験  (3)地盤工学的観点におけるシラス堤防の技術的課題に関する検討  (4)水工・水理学的観点からの肝属川水系の降雨流出特性に関する検討  (5)大隅河川国道事務所との意見交換結果を踏まえた研究成果のとりまとめ</p> <p>（研究成果の河川整備・管理への反映）</p> <p>研究成果によりシラス堤防の浸透や越水に対する安定性についての知見を高め、シラス堤防強化対策に関する知見の蓄積およびシラス堤防管理に有用な手法の提案に繋げ、シラス堤防の質の向上やシラス土工指針への知見の反映が期待できる。</p>					

## ⑥研究成果

(様式 E-10と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

### 1. 本研究内容の概要

本研究で取り組んだ研究項目については、以下の通りである。

- (1) シラス堤防における過去の被災事例調査と被災メカニズムの検討
- (2) シラス堤防の浸透や越水に対する安定性に関する室内土槽実験
  - (2-1) シラス堤防の浸透に対する安定性に関する室内土槽実験
  - (2-2) シラス堤防の越水に対する安定性に関する室内土槽実験
- (3) 地盤工学的観点におけるシラス堤防の技術的課題に関する検討
  - (3-1) シラス堤防強化策の効果に関する検討
  - (3-2) シラス堤防の堤体土の水分保持特性および透水係数に関する考察
  - (3-2) 不飽和浸透を考慮した斜面安定解析手法の提案
- (4) 水工・水理学的観点からの肝属川水系の降雨流出特性に関する検討
- (5) 大隅河川国道事務所との意見交換結果を踏まえた研究成果の取りまとめ

各項目における研究の方法についてまとめる。

“(1)シラス堤防における過去の被災事例調査と被災メカニズムの検討”においては、南九州地域のシラス堤防の被災事例について、資料調査や現地踏査をもとに、被災時の気象や水文データ、被災状況について分析し、被災メカニズムについて検討した。

“(2) シラス堤防の浸透や越水に対する安定性に関する室内土槽実験“について、豊浦砂および肝属川の堤体材料を用いた土槽実験を行い、ドレーン工周辺の堤体土中の浸透挙動について把握した。また、越水時の堤体土の侵食後の形状についてドレーンの有無による違いを観察した。

“(3) 地盤工学的観点におけるシラス堤防の技術的課題に関する検討“について、シラス堤防における強化策として用いられている川表側の遮水シートやドレーン工の施工箇所を観測されている水位や土壌水分計などの結果から、強化策の効果について考察した。また、シラス堤防の浸透に対する安全照査に必要な不飽和土の保水・透水特性に関する土質試験および概念モデルによる推定に取り組んだ。さらに、不飽和浸透を考慮した斜面安定解析手法の提案を行った。

“(4) 水工・水理学的観点からの肝属川水系の降雨流出特性に関する検討”については、肝属川水系周辺の地盤は、他の地域よりも排水性が高い層があることがわかった。桜島や霧島などに由来する火山砕屑物の影響と推察されたことから、地質毎の入力パラメータについて検討した。

“(5) 研究内容の意見交換”について、大隅河川国道事務所と実施する内容や課題解決に向けた意見交換を十分に行った。

### 2. 主な研究成果のまとめ

以下に、本研究課題の主な研究成果について紹介する。

#### 2.1 シラス堤防における過去の被災事例調査と被災メカニズムの検討

南九州地域のシラス堤防の被災事例について、過去に大隅河川国道事務所が調査した被災記録および浸透破壊およびパイピング破壊に対する安全性を照査した詳細点検結果<sup>1)</sup>などを用いて考察を行った。また、被災時の河川水位のデータ(国土交通省水文水質データベース<sup>2)</sup>)を用いて、被災時にどのような外力が堤体に作用したかを考察した。

図-1に肝属川流域での過去の被災についてまとめた。被災形態の分類としては、堤体に関しては、堤防崩壊(破堤、堤防欠壊など)、のり面崩壊、のり面変状、吸い出しとして分類され、河岸・低水護岸については、河岸崩壊、護岸崩壊、河床洗掘などの種類がある。肝属川流域(肝属川、串良川、始良川、高山川)の過去の被災状況(昭和26年~平成26年)を見ると、堤体に破堤やのり面崩壊が発生したのは36件記録

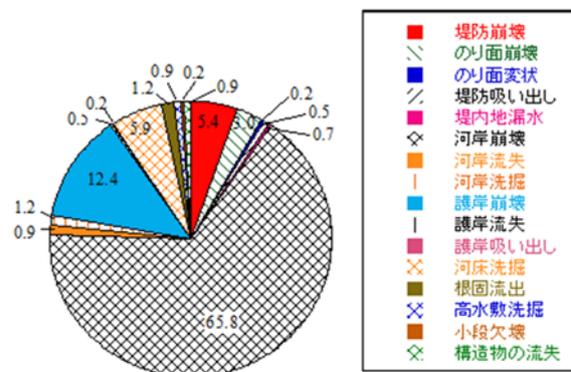


図-1 肝属川流域での被災状況

## ⑥研究成果（つづき）

されている。その内 21 件は、昭和 51 年より以前に発生している。

昭和 53 年に「シラス地帯の河川・道路土工指針（案）」が作成され、指針（案）に準じた築堤がなされてきており、昭和 54 年に 9 件の堤防決壊や破堤が生じているが、それ以降は、堤防の被害および規模は小さくなってきている。また、水量データの調査では、1990 年代から 2000 年代にかけて、激しい降水が観測されているが、被害の程度は以前よりも減少しており、指針（案）などの効果が現れているのではないかと考えられる。

被災時の河川水位と被災箇所近傍の堤防の断面図から当時の堤防に働いた外力について考察した。肝属川水系の高山川4/100地点付近で生じた1979（昭和54）年9月30日の被災（堤防欠壊）について、高山橋観測所のデータ（図-2）を用いた。図より、午前10時～11時に5.32mの水位を示している。高山橋の避難水位は、5.1mに設定されている。被災箇所近傍の堤防の約T.P.6m付近は、堤防の法尻部付近で地質はAS（二次シラスの堆積層）であり、河川水の流れにより侵食された可能や堤体内の雨水の浸透が原因で欠壊が生じたものと考えられる。

過去の崩壊事例や浸透や侵食に対する安全照査の資料調査、これまでの肝属川流域の視察などの経験を踏まえた地盤工学的見地からシラス堤防の破壊メカニズムを考えると以下の様な崩壊メカニズムが想定される。①降雨時の雨水浸透による堤防内の飽和度の増加、せん断強度の低下による安定性の低下、②天端路面を流れる雨水による周辺の侵食、③河川水位上昇に伴う堤体内の浸潤面の上昇による川裏のり面、のり尻の不安定化、④河川水位の急な低下後の川表のり面の不安定化、⑤堤内地からの地下水が川表から浸出することによる不安定化、⑥内水による川裏のり面の不安定化などが考えられる。特に、肝属川の中上流部は、平野部がシラス台地に挟まれ、河床が周辺の地盤よりも低い箇所があり、⑤や⑥のように護岸周辺の陥没などが起きやすい箇所もあると考えられる。

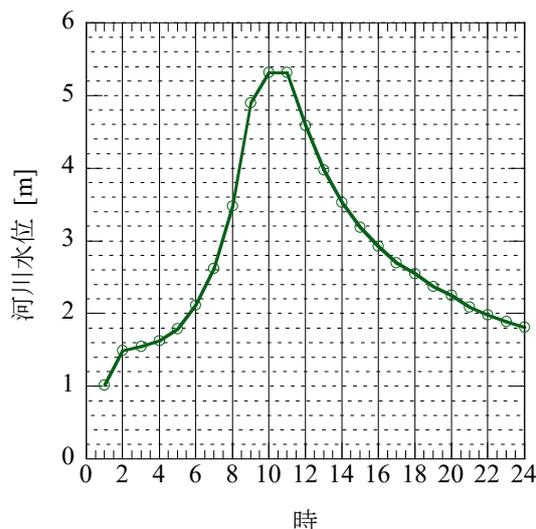


図-2 昭和 54 年 9 月 30 日の高山橋観測所の水位（国土交通省水文水質データベース<sup>2)</sup>）

## 2.2 シラス堤防の浸透や越水に対する安定性に関する室内土槽実験

### (1) 浸透に対する安定性に関する室内土槽実験

肝属川河川堤防に用いられる土（以降、堤体土）を用いて実験を行った。図-3に実験土槽の模式図を示すように、堤体の境界から一定水位45cmを与えた時の、ドレーン周辺の浸透挙動を土壌水分計で観測した。図-4に飽和度の時系列変化を示す。図および観測結果から、堤体土に浸透した間隙水は、ドレーン側面からは排水されず、ドレーンより下部の土が飽和した後に、ドレーンと木枠の間から排水されていることが分かった。これは、豊浦砂を用いた実験でも同様であった。また、地下水面よりも高い位置の土も飽和度 80%程度となっており、地下水以上の堤体土も飽和度上昇に伴い強度が低下しているものと考えられる。

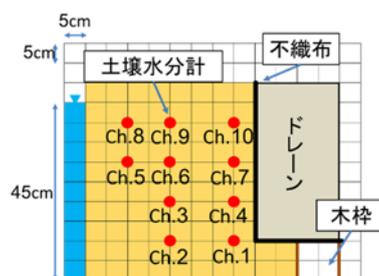


図-3 浸透実験土槽模式図

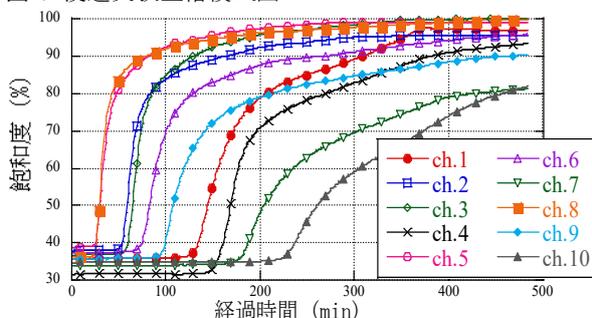


図-4 堤体土中の飽和度の時系列変化

### (2) 越水に対する安定性に関する室内土槽実験

図-5に実験土槽の模式図を示す。実験では、まず片側から一定水位30cmを与え、排

## ⑥研究成果 (つづき)

水を確認した後に水位を15cmに降下した。その後、半日ほど時間を置き水位を上げ越流を開始し、破堤もしくは土砂の流出が治まった際に実験を終了した。堤体土中の浸透挙動を土壌水分計により計測した。まず、ドレーン無しの場合の実験経過は、実験開始11時間後に水位を降下し、その後、越流を開始して、約35分後に土砂の流出が治まり実験を終了した。一方、ドレーン有りの場合は、実験開始14時間後に水位を降下、越流開始26分後に土砂の流出が治まり実験を終了した。図-6にドレーン有無におけるそれぞれの土槽実験中の堤体内の飽和度の時系列変化を示している。ほとんど浸透挙動には違いは見られないが、ドレーン有りのドレーン直下の飽和度上昇がドレーン無しの場合に比べ、急激になっており、ドレーン周辺に間隙水が集まり、ドレーン底部から排水されているためと考えられる。また、水位降下後(ドレーン無し:約11~23時間, ドレーン有り:約14~26時間)も堤体内の飽和度は低下しにくいことがわかる。

さらに、ドレーンの有無による越流による侵食状況について観察した(写真-1)。その結果、ドレーン有りの堤体の方が侵食された土砂の流出が抑えられること、ドレーンが無い場合は、法先から侵食され進行性破壊が生じやすく、大量の土砂が流出することが分かった。侵食は、全体的に生じるが、特に土槽境界部での侵食が大きく、堤防内にコンクリート構造物などの施設がある場合は注意が必要である。また、ドレーン工のみではなく、遮水シートなどと併用し堤体内に水が浸入しにくい構造にすることが、シラス堤防でも有効であると考えられる。

### 2.3 地盤工学的観点におけるシラス堤防の技術的課題に関する検討

#### (1) シラス堤防の堤体土の水分保持特性および透水係数に関する考察

簡易蒸発法(HYPROP)による水分特性曲線と露点ミラー方式(WP4C)による水分特性曲線の組み合わせを行った。HYPROPの測定範囲は $16\% < S_r < 100\%$ , WP4Cは $S_r < 20\%$ であったことから、その範囲で得られたデータを組み合わせた(図-6)。図より、WP4Cの水分特性曲線が、HYPROPの水分特性曲線を補完するようなプロットになっていることが分かる。また今回の測定においてHYPROPでは測定終了までにおよそ17日の期間を要し、WP4Cは1点測定するのにおよそ20分程度で、比較的短期間で広範囲の水分特性曲

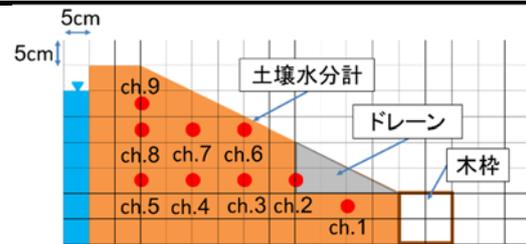
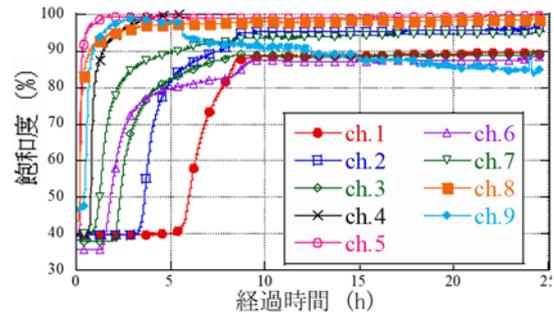
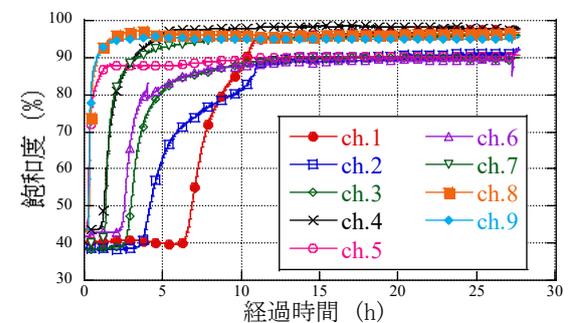


図-5 越流実験土槽模式図



(a) ドレーン無し



(b) ドレーン有り

図-6 越流実験の飽和度の時系列変化



(a) ドレーンなしの崩壊後の様子



(b) ドレーンありの崩壊後の様子

写真-1 越水実験の試験結果

## ⑥研究成果（つづき）

線が得られる可能性が示唆された。今後、データを蓄積し従来の保水性試験との比較を行い測定方法の妥当性について確認していく必要がある。

### (2) 不飽和浸透を考慮した斜面安定解析手法の提案

室内土槽実験により、堤体内の地下水位よりも上にある土も高い飽和度を有していることが観察された。一方、『河川堤防の構造検討の手引き』では、浸透に対する堤防の安全照査方法について、不飽和浸透解析を実施したあとに、円弧すべり法による安定計算法を用いることが紹介されている。その安全率の式においては、地下水位に基づく間隙水圧をすべり面に作用する間隙水圧として考慮されている。しかしながら、不飽和土部分の間隙水圧については、特に明記されておらず、土塊自重として不飽和土部分の間隙水の重量は含まれていると考えられるが、どのように扱われているかは不明である。これは、安全照査の実施者が使用するソフトウェアによって、その取り扱いが変わると考えられる。そこで、本研究では、不飽和土中の間隙水圧または不飽和浸透流を考慮した斜面安定解析について検討した。今回は簡単のため無限斜面法を用いて妥当性の検討を行った。一般的に体積法と水圧法は同じ力学的効果を持っており、同じ結果を得るはずであるが、不飽和土中の間隙水圧の作用面積の影響で、不飽和土中の浸透挙動を考慮した場合、体積法と水圧法が一致しないことが分かった。そこで、不飽和土中の間隙水圧の作用面積について検討し、妥当性の向上を試みた（図-7）。また、時々刻々と変化する斜面の安定性評価をするために、不飽和浸透解析と提案する斜面安定解析手法を組み合わせ計算プログラムを作製し、安全照査への適用可能性を確認できた。

### 3. 今後の展望

資料調査や打合せをする中で、浸透に対する安全照査などで用いられる不飽和土の浸透特性や強度特性の土質試験結果が不足していることから、今後、シラス堤防の堤体土に関する不飽和土質試験データの蓄積を行う予定である。

### 4. 河川等政策への質の向上への寄与

本研究において、シラス堤防の地盤工学的特性を詳細に調べ、堤防管理に有用な知見を得ることができた。本研究で得られた成果を「シラス地帯の河川・道路土工指針（案）」の基礎資料となることを目指して、実務者らが必要としているデータや試験方法、考え方などをまとめて行きたい。

### 参考文献

- 1) 国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所：肝属川河川基本技術会議資料，2016。
- 2) 国土交通省の水文水質データベース：  
(<http://www1.river.go.jp/>)

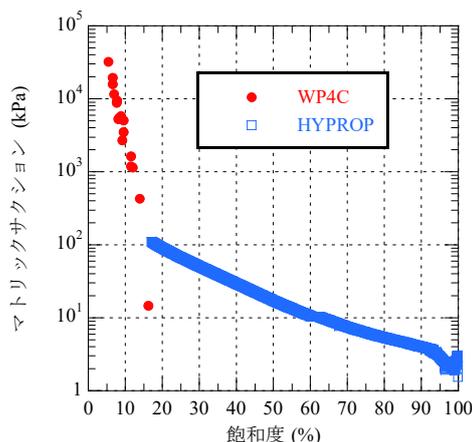


図-6 堤体土の水分特性曲線

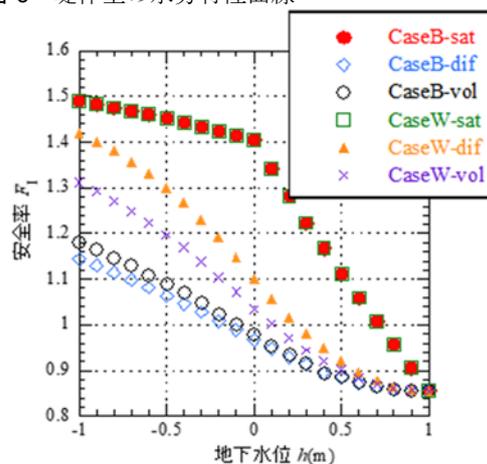


図-7 提案する斜面安定解析の検討結果

## ⑦研究成果の発表状況

(本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。(以下記入例))

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書(教科書、学会妙録、講演要旨は除く)
- ・国際会議、学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など、知的財産権の取得状況
- ・技術研究開発成果による受賞、表彰等)

- (1) 宇都遼太郎, 酒匂一成: 不飽和浸透を考慮した体積力法による斜面安定解析に関する一考察, 第52回地盤工学研究発表会, pp.1799-1800, 2017.
- (2) M. Tsuyama, K. Sako, and T. Saita : Literature Research on Damages of Shirasu levees and Rainfall-runoff analysis in the Kimotsuki River Basin, Proc. of The First Joint Seminar on Landslide, Flood Disasters and the Environmental Issues, Paper No.SD2-1, pp.1-8, 2017.
- (3) R. Uto, K. Sako, R. Kitamura: A Study on Slope Stability Analysis Considered Seepage Force, Buoyance and Apparent Cohesion of Unsaturated Soils, Proc. of The First Joint Seminar on Landslide, Flood Disasters and the Environmental Issues, Paper No.SD2-2, pp.1-8, 2017.
- (4) 宇都遼太郎, 酒匂一成: 不飽和浸透を考慮した体積力法および水圧法による無限斜面法の計算結果の比較, 平成29年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.379-380, 2018.
- (5) M. Tsuyama, K. Sako, R. Uto, S. Ito, and R. Kitamura: Calculation Results of Infinite Slope Method expressed by Body Force Method/ Water Pressure Method considered Unsaturated Seepage Behavior, Proc. of the 2nd Joint Seminar on Landslide, Flood Disasters and the Environmental Issues, Paper No.S2-1, pp.1-8, 2018.
- (6) 津山雅徳, 酒匂一成, 宇都遼太郎, 伊藤真一, 北村良介: 不飽和浸透を考慮した体積力法および水圧法による無限斜面法の計算結果に関する検討, 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.49-54, 2018.
- (7) 宮地志門, 酒匂一成, 伊藤真一: 室内土槽試験による堤体ドレーン工周辺の浸透挙動に関する一考察, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.461-462, 2019.
- (8) 中島亮輔, 酒匂一成, 伊藤真一: 露点ミラー方式と簡易蒸発法による土の水分特性曲線の測定に関する一考察, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.475-476, 2019.
- (9) 津山雅徳, 酒匂一成, 伊藤真一, 北村良介: 不飽和浸透特性を考慮した無限斜面法の改良に関する検討, 平成30年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.493-494, 2019.

## ⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

研究室ウェブ上で、研究成果の公表を予定。

<http://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/~soil/about.html> ※2019年4月以降にwebページ変更予定。

URL : <http://tmnr-st.sakura.ne.jp/wp/>

## ⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

### (1) 土木学会西部支部優秀講演者賞

宮地志門，酒匂一成，伊藤真一：室内土槽試験による堤体ドレーン工周辺の浸透挙動に関する一考察，平成30年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，2019。

## ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

堤防の浸透に対する安全照査には、堤体土の水分特性曲線や相対透水係数などのデータ蓄積が必要である。より簡易に短時間でデータ収集出来る試験方法の精度向上が必要である。また、不飽和土のせん断強度パラメータの試験データの蓄積が必要と思われる。また、不飽和土の浸透特性を考慮した斜面安定解析の提案に関する研究について、不飽和土中の浸透力や間隙水圧差による体積力の提案を行い、その安全率への影響について検討した。シラスは侵食されやすい材料であるため、堤防の一部が部分的に壊れ、その後、崩壊域が進展していく様な進行性破壊の検討が必要であるため、提案した手法をさらに一般化した式に拡張し、不飽和浸透解析と組み合わせることで、堤防の進行性破壊の検討などを行えるモデルの構築をする必要があると考えている。

シラス堤防の浸透および越水に対する室内土槽試験の結果については、ドレーン周辺の浸透挙動および越水際の堤防の侵食状況について、その成果を学生及び技術者への教育素材として利用する予定である。

肝属川水系周辺の地盤は他の地域よりも排水性の高い層があり、降雨流出に大きく影響することが分かった。そこで、地質毎の入力パラメータについて検討することができた。今後、流出解析の精度向上に向けて、肝属川水系のハイドログラフに関するデータの蓄積が必要である。

これらにより、肝属川流域のシラスを含む材料を用いた堤防について、安全性照査などを検討する際に必要な知見の蓄積を図る。得られた成果を「シラス地帯の河川・道路土工指針(案)」に役立てることを目指す。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究では、主にシラス堤防の浸透に対する安全照査の結果から、どのような堤防が不安定と判断されるかについての検討、不飽和土中の浸透力や間隙水圧差による体積力を考慮した斜面安定解析手法の提案、ドレーン工周辺の浸透挙動把握および越水時の侵食状況を把握するための土槽試験、不飽和浸透解析に必要な保水特性や透水特性を蓄積するための土質試験などに取り組んだ。また、肝属川流域に分布する主に火山砕屑物からなる地質(ボラなど)が降雨流出に与える影響を数値モデルに反映させるための方針に関する検討を行った。

本研究の成果として、これまで明確ではなかったシラス堤防の地盤工学的特性を詳細にしらべることができた。これらの知見は、大隅河川国道事務所と調整の上、実務へ反映しやすい状態にできる様に工夫を加えたい。特に、築堤材料としてのシラスの水分特性曲線や不飽和透水係数などの基礎データの蓄積については、今後のシラス堤防の浸透に対する安全照査で必要となるものであることから、実務で重要度の高い部分から重点的に実施していく必要があると考えている。

これらの成果について、「シラス地帯の河川・道路土工指針(案)」の基礎資料となることを目指しており、実務者らが必要としているデータや試験方法、考え方などについて、まとめたい。