

学 位 論 文 要 旨

氏 名

来間 玄次

題 目

琉球石灰岩域における降雨流出とドリーネの浸透排水に関する研究
(Studies on Rainfall Runoff and Doline Infiltration Drainage in a Ryukyu Limestone Region)

琉球石灰岩域では、河川が未発達な地域が多く、流域の多くは、すり鉢状の地形をなしているため、降雨はその底部付近に存在するドリーネの浸透孔から、地下に排水される事例が多い。このような地域では、台風等の豪雨の度に、ドリーネの浸透能力の機能低下が原因で、周辺農地は深刻な湛水被害に見舞われ、農業経営上、大きな問題を引き起こしている。

本研究は、このような地域における降雨流出と、ドリーネによる浸透排水の関係を解明することを目的に行ったものである。解析手法としては、降雨流出と浸透排水を一連の現象として有機的に捉えることにした。まず降雨流出量を浸透池であるドリーネへの流入量とし、この流入量とドリーネからの浸透量との差を浸透池の残留量とした。これから流入量－浸透量－残留量の収支関係について、解析モデルを構築してシミュレーションにより再現し、そのメカニズムを明らかにした。これまでの研究では、浸透孔はドリーネの底部に設定して、浸透排水のシミュレーションを行っていたが、このような手法では、この地域にみられる横浸透孔や鍾乳洞のトンネル「パイプフロー」の役割を十分に捉えることができない。本研究では、これらの複雑な役割を考慮するために、浸透池の水位に応じて浸透孔を設定し、水位と浸透孔面積の関係を数式化して解析モデルに組み込んだ。

ここでは、この解析モデルを糸満市アシチャガー地区と真壁地区に応用した。これらを調査地に選定した理由は、アシチャガー地区は、湛水被害解消のためにトンネルを導入し、また真壁地区は、湛水被害解消に向けた対策工法を検討していることから、対照的な2つの事例を比較考察できるからである。

アシチャガー地区では、横浸透孔を浸透排水のモデルに組み込むことで、実測水位の変動と近似するシミュレーション結果が得られた。また、アシチャガー周辺の湛水被害を解消するため、国営かんがい排水事業でトンネル工法による排水対策が取られている。今回の研究では、新しい試みとしてドリーネにトンネルを導入したときの効果について解析した。

一方、真壁地区では、ほ場整備(真壁南地区)前の自然の状態での旧況ドリーネの浸透排水の解析を行い、さらに浸透池を新設したほ場整備後の浸透排水の効果を検証した。これらの対策の効果を評価・比較するためには、この地域における降雨流出と浸透排水の仕組みを明らかにする必要がある。今回の研究では、流域をブロック化し、表面流出モデルを用いて、降雨流出を求めた。浸透排水については、県道と隣接した2つの浸透池における異なる浸透能、暗渠による浸透池間の越流、パイプフローによる排水等のメカニズムを解析モデルに組み込み、シミュレーションを行うことで、浸透排水を再現することができた。

これらの研究成果は、今後の湛水被害解消に向けた対応策の効果を検証するときに、重要な役割を果たすものと考えられる。

学 位 論 文 要 旨

氏 名	Genji Kurima /
題 目	Studies on Rainfall Runoff and Doline Infiltration Drainage in a Ryukyu Limestone Region (琉球石灰岩域における降雨流出とドリーネの浸透排水に関する研究)

River systems are often primitive in “Ryukyu” coral limestone soil regions. Therefore, water is drained through underground infiltration from a doline. A lower infiltration capability coupled with typhoon and heavy rain often triggers flood damages, which jeopardizes agricultural crop production in these areas.

The objective of this study is to clarify and improve our understanding of the relationship between rainfall-runoff and infiltration drainage through a doline in these regions. We considered rainfall-runoff and infiltration drainage as a series of phenomena within a model. First, we estimated the inflow to a doline based on the amount of runoff. Then, we evaluated the residues by computing the differences between the inflow to a doline and infiltration drainage through a doline. Finally, we developed a mathematical simulation model and simulates an input-output relationship of these drainage systems. Although, most previous studies modeled the penetration aperture only at the bottom of doline, this approach cannot sufficiently capture the roles of side apertures and limestone pipes for drainage. In this study, in order to reflect this complex systems in the model, we varied the size of side apertures depending on the water level of a seepage basin, modeled the relationship between the cross sectional area of side apertures and the water level, and incorporated this mechanism into our simulation model.

In this study, we applied this simulation model to two regions, 1) “Ashi-chaga” region where a tunnel drainage system has been introduced for mitigating flood damages, 2) “Makabe” region where several measures have been discussed for mitigating flood damages. Our simulation model was able to closely approximate the observed water level changes by explicitly modeling the effect of side apertures in “Ashi-chaga” region. In this region, the tunnel had been constructed as a drainage measure. In our analyses, we examined the effect of the tunnel drainage on the degree and extent of flood damages. Our simulation model can quantify the effect of tunnel drainage on flood damages.

In “Makabe” region, we evaluated and compared the pre-ground maintenance without an infiltration pond and post-ground maintenance with an infiltration pond installed for analyzing the effect of this maintenance on infiltration drainage. We computed the rainfall outflow of our study site using a surface runoff model. We simulated infiltration of our study site by modeling two adjacent infiltration ponds with different infiltration capabilities, overflow among these two adjacent ponds through a subterranean drain system, and pipe flow drainage system. Our simulation model was able to closely approximate the observed water level changes by modeling this complex multiple drainage ponds system.

Our simulation results indicate that this modeling approach is useful for evaluating proposed measures for mitigating flood damages in these regions.

学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏名	来間 玄次
審査委員	主査 琉球大学 教授 仲間 勇栄
	副査 琉球大学 教授 井上 章二
	副査 鹿児島大学 教授 曾根 晃一
	副査 佐賀大学 教授 稲岡 司
	副査 琉球大学 准教授 木島 真志
審査協力者	
題目	琉球石灰岩域における降雨流出とドリーネの浸透排水に関する研究 (Studies on Rainfall Runoff and Doline Infiltration Drainage in a Ryukyu Limestone Region)
<p>琉球石灰岩域では、河川が未発達な地域が多く、流域の多くは、すり鉢状の地形をなしているため、降雨はドリーネの浸透孔から、地下に排水される事例が多い。このような地域では、台風等の豪雨の度に、ドリーネの浸透能力の機能低下が原因で、周辺農地は深刻な湛水被害に見舞われ、農業経営上、大きな問題を引き起こしている。そのため、湛水被害軽減のために様々な対策を早急に検討し、実施する必要がある。これら対応策の効果を評価するためには、琉球石灰岩域における浸透排水メカニズムを解明する必要があるが、これまでの研究では浸透孔が浸透池の底部にあると仮定した単純なモデルを用いて浸透排水の分析を行ってきたため、この地域に特徴的にみられる横浸透孔や鍾乳洞のトンネル「パイプフロー」が浸透排水に果たす役割を十分に捉えることができなかった。本研究では、これらの複雑な役割を考慮し、琉球石灰岩域における降雨流出と、ドリーネによる浸透排水の関係を解明することを目的とした。解析手法としては、降雨流出と浸透排水を一連の現象として捉えた。降雨流出は特性曲線法を用いた表面流モデルにより求め、浸透排水は、トリチェリーの定理を用いて、ドリーネの浸透孔断面積と水位の関係を数式化して、解析モデルに組み込んだ。</p>	

本研究では、異なる2つの事例を比較考察するため、この解析モデルを糸満市アシチャガー地区と真壁地区に応用した。アシチャガー地区では、湛水被害解消のためにすでにトンネルを導入している。一方、真壁地区では、湛水被害解消に向けた対策工法を現在検討中である。

アシチャガー地区では、横浸透孔を浸透排水のモデルに組み込むことで、実測水位の変動と近似するシミュレーション結果が得られた。また、このシミュレーション結果から、2000年12月降雨(最大時間雨量54.0mm、総雨量187.0mm)におけるピーク流出量は $8.51\text{m}^3/\text{sec}$ であったことが明らかになった。さらに、このシミュレーションモデルで採用されたパラメータを用いて、1999年9月降雨(最大24時間雨量477.0mm、総雨量555.0mm)について水位変化をシミュレーションしたところ、ピーク水位は実測値の6.7mに対して、シミュレーションでは6.8mとなり、実測値に近似したシミュレーション結果となった。また、この時のピーク流出量が $25.91\text{m}^3/\text{sec}$ であったことが明らかになった。現在、アシチャガー周辺の湛水被害を解消するため、国営かんがい排水事業でトンネル(馬てい形断面2r型)による排水対策が取られているが、いまだ1999年に匹敵する大きな降雨は見られず、トンネル導入の効果が評価できていない。そこで、今回の研究では1999年の降雨データを用いて、初めてトンネル導入の効果をシミュレーションにより検証した。その結果、トンネル導入により最大湛水面積が65%程度減少し、総排出量の82%がトンネル排水によることが明らかになった。

一方、真壁地区については、県道と隣接した1号浸透池と8号浸透池の2つの浸透池における異なる浸透能、暗渠による浸透池間の越流、県道のオーバーフローによる越流、パイプフローによる排水等の形状・寸法を解析モデルに組み込み、シミュレーションにより降雨流出と浸透排水の仕組みを再現することができた。真壁地区において20haが湛水し、施設園芸作物等に多大な被害を及ぼした、2007年8月の降雨(日雨量457mm、最大時間雨量83.5mm)について、水位変化をシミュレーションした結果、湛水のピーク水位が標高 $EL=26.3\text{m}$ であり、県道の道路長約110mの区間で冠水が生じていたことが明らかになった。また、これまでは、各浸透池における降雨流出量が不明であったが、このシミュレーションの結果、1号浸透池におけるピーク流出量は $28.4\text{m}^3/\text{sec}$ 、累加流出量は $445,029\text{m}^3$ 、8号浸透池については、それぞれ $6.2\text{m}^3/\text{sec}$ 、 $113,706\text{m}^3$ であったことが明らかになった。パイプフローについては、1号浸透池より下流方向に鍾乳洞の存在が確認されていたが、本研究では実測水位と整合するパイプの特徴を明らかにすることができた。パイプ底高は標高 $EL=18.5\text{m}$ (浸透池の底高 $EL=16.5\text{m}$)であり、その直径が $D=80\text{cm}$ 、粗度係数 $n=0.1$ の時に実測水位と最も一致した。

これらの研究成果は、今後の琉球石灰岩域における湛水被害解消に向けた対応策を検証するときに、新たな知見を提供し、応用されていくものと期待される。

最終試験結果の要旨	
学位申請者氏名	来間 玄次
審査委員	主査 琉球大学 教授 仲間 勇栄
	副査 琉球大学 教授 井上 章二
	副査 鹿児島大学 教授 曾根 晃一
	副査 佐賀大学 教授 稲岡 司
	副査 琉球大学 准教授 木島 真志
審査協力者	
実施年月日	平成 25年 1月 12日
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。) ○口答・筆答	
<p>主査及び副査は、平成25年1月12日の公開審査会において、学位申請者に対して、学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士(農学)の学位を受けるに必要な十分の学力並びに識見を有すると認めた。</p>	

学位申請者 氏名	来間 玄次
<p>【質問1】アシチャガー地区では2つの降雨についてシミュレーションを行っているが、シミュレーションモデルのパラメータの推定は、どの降雨について行ったものなのか？</p> <p>【回答1】パラメータの推定は2000年12月降雨(最大時間雨量54.0mm、総雨量187.0mm)を用いた。この降雨は、22日間に及んで先行降雨がなく、ドリーネへの流入量に与える影響を排除でき、純粹に浸透能を評価できるので、パラメータの推定に適している。</p> <p>【質問2】1つの降雨でパラメータを決定して、それ程湛水していない場合や、一気に湛水被害が出た場合、このモデルの整合性が、どうであったかを検証すべきではないか？ このモデルで全てに適用できるのかどうか分かるのでは？</p> <p>【回答2】湛水が少ない場合の検証は、先程の2000年12月降雨を用い、湛水が大きい場合は九州・沖縄へ上陸して甚大な被害をもたらした1999年9月の台風18号の降雨(最大24時間雨量477.0mm 総雨量555.0mm)を用いた。2000年12月降雨で設定したパラメータを用い1999年12月降雨をシミュレーションした結果、実測値とほぼ一致した。</p> <p>【質問3】湛水被害の対策工法として、トンネル工法、縦坑による方法や浸透池の規模拡大等、3つ程の案があるが、それぞれの工法についてシミュレーションし、提言すると云う事がこのモデルで現実的にできるのではないかと思うが？</p> <p>【回答3】トンネルの効果の検証は、アシチャガーで実績があり、検討する別のモデルにトンネルのデータを組み込むことで、効果の検証・予測は可能である。浸透地の規模拡大については、水位と湛水面積・湛水量曲線をモデルに組み込み、シミュレーションすることで適正な浸透池面積・容量を設定することが可能である。縦坑による方法は、地下水盆に浸透させる案であるから、地下水位を管理して地下への浸透量を貯留できる容量の確保が必要等の課題もあるが、シミュレーションによる提案は可能である。解析モデルは、湛水被害の解消に向けた工法検討に応用できる基礎研究になるものと考ええる。</p> <p>【質問4】湛水被害が生じないような浸透池の湛水量を全部流してしまうには、どれぐらいの規模のトンネルが必要かというのも計算できるのか？</p> <p>【回答4】計画降雨量における降雨流出量を用いて、トンネルのパラメータを解析モデルに組み込み、シミュレーションによりトンネルの適正規模を求めることは可能である。</p> <p>【質問5】ケーススタディとして、このモデルの汎用性、どこまで応用できるのか、というのがあればよいかと思う。場所が変われば、もう一度過去のデータに遡り、パラメータを推定する事が必要になるのか？</p> <p>【回答5】本研究の狙いもモデルの汎用性を生かし、他の湛水被害地区に応用する事も目的の一つである。解析のモデルは、降雨流出と浸透排水からなる。降雨流出はその地区にあった流域・数理モデルを組み込み、また、浸透排水は、ドリーネの浸透孔等のパラメータの設定が新たに必要となるが、本研究の成果は十分に生かすことができる。</p>	

【質問6】研究の地区に関しては、予測ということも可能だと思うのですが、気になるのは、このまま雨が降り続ければ、どうなるのか、というようなことは予測可能か？

【回答6】降雨と降雨流出、降雨流出と浸透排水の関係はタイムラグがある。特に、降雨と浸透排水はタイムラグが大きい。仮に、台風による豪雨の場合、降雨は降り止んで、かなり後に湛水のピークを迎えるので、降雨量をモデルに組み込めば、物理的には予測は可能である。また、湛水が何日後に収まるかも予測可能である。

【質問7】これまでの研究のレビューをされているのが、このシミュレーションモデルが既往研究のものどう違うのか？具体的に違いを示すことで、このモデルの価値というのが、より明確になるのではないか？

【回答7】既往研究では、例えば、浸透排水の場合、浸透池の底部にのみ浸透孔が存在するものとしていたので、実測値との整合性に若干の無理があった。本研究のモデルは、現地の実情に即したモデルに組み込むことで、より実測値に近似することができたと考えている。

【質問8】地下水位のパラメータは？

【回答8】本研究では、単一の地下水盆を対象としているが、複数の地下水盆を同時に解析するためには、地下水位のパラメータを組み込むことが必要と考える。浸透排水と地下水の挙動を明らかにするためには、各断層で仕切られた地下水盆を一連のネットワークとして設定する必要がある。本研究の成果は、今後、地下水位の観測データと地下水量の関係を、広域の解析モデルに発展させることで、地下水位と連動した浸透排水メカニズムの解明に生かされるものとする。

【質問9】累可損失雨量はどのようにして求めたか？

【回答9】ここでは流域から浸透池へ流入する降雨流出量を雨量に換算したものを有効雨量として扱い、累加雨量からこれを差し引いた残りを累加損失雨量とした。主に地下浸透量がこれに含まれる。

【質問10】ドリーネの排水解析に、トリチェリーの定理が適用できると判断した理由は？

【回答10】真壁地区では、末端の排水路がなく、地下浸透で排水が処理されている。台風接近中の降雨時には、さほど湛水は見られなかったが、台風が去った後に、浸透池周辺の農地が、広範囲に湛水しているのを目の当たりにした。この時に、ドリーネの浸透能力を超えた流入量で湛水が生じていることに気づき、この仕組みは、漏斗の器とそれに注ぐ水の関係と同じ理屈だと考えた。このことが、水圧で排水量が変わるトリチェリーの定理を応用するきっかけとなり、本研究に繋がった。