

京都大学	博士 ( 農 学 )	氏名	A.K.M. ADHAM
論文題目	Simulation Studies of Environmental Effects on Groundwater Quality and Subsurface Dam (地下ダムとその水質に関する環境影響のシミュレーション的研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>沖縄県や鹿児島県の離島において、その主たる構成地質は空隙が多く、透水性も非常に大きい石灰岩であり、地表にダムやため池を建設しても水を貯留することが困難となる。そこで、地下に透水性の低い壁を構築することにより、地下水位を高く維持し、地下水を揚水ポンプで汲み上げる地下ダムが施工され、汲み上げた地下水を作物の灌漑に使用する。地下ダムでは止水壁と揚水井戸が必要となるが、石灰岩は水に溶解しやすく、石灰の溶出により揚水井戸の機能が低下するため、地下ダムの運営では揚水井戸の維持管理が重要となる。</p> <p>一方、近年の降雨の酸性化、地球温暖化による降雨量の増大、気温の上昇は、石灰岩の溶解過程に大きく影響を与えるために、地下ダムの運営や管理においては、この影響を考慮した維持管理法を検討することが急務とされる。</p> <p>本論文は、石灰岩の溶解過程に与える上記諸項目の影響を数値解析により検討するとともに、実際の地下ダムの地盤状況をモデル化して、地球温暖化が地下ダム運営に及ぼす影響を予測することを目的としている。その内容は、以下のように要約される。</p> <p>1. 石灰岩の溶解過程を再現する数値解析手法を開発した。石灰岩の溶解に与える地球温暖化の影響を詳細に検討するために、<math>H^+</math>、<math>CO_3^{2-}</math>、<math>Ca^{2+}</math>を基礎化学種とした1次元の移流分散方程式を解き、その結果を用いて<math>H_2CO_3</math>、<math>HCO_3^-</math>濃度を平衡定数から導いた。さらに、反応定数を温度の関数で与えると同時に、降雨強度の違いを流速の変化として扱い、境界における<math>H^+</math>濃度により降雨のpHの変化を与えた。これらを総合して、地球温暖化の影響を検討する手法を開発した。</p> <p>また、実際の地下ダムにおける挙動を予測するために、準3次元解析手法に上記手法を展開した。ここで、降雨のpH変化を降雨強度の関数として扱い、基礎化学種を<math>CO_3^{2-}</math>と<math>Ca^{2+}</math>の2つに簡便化した。そして、現地で実測された透水係数、帯水層厚さ、および有効空隙率の情報を地球統計学的手法により各要素に与え、実際に近いモデルを作成して、温暖化の影響を予測した。</p> <p>2. 地球温暖化の石灰岩の溶解に与える影響を推定した。すなわち、上述の1次元の詳細解析手法を用いて、降雨のpHの変化、降雨量の変化、および気温の変化が空隙率に与える影響をFOSM (First Order Second Moment : 一次近似二次モーメント) 法で検討した。空隙率の変化は、<math>Ca^{2+}</math>の濃度から<math>CaCO_3</math>の溶解量を求めることにより推定した。FOSM法で必要となる標準偏差は、pHについては世界中の異なる場所で計測されている降水の測定値からこれを求めた。降雨については、宮古島で計測された過去50年の降雨データから、気温については、他の研究者によって予測されている気温上昇の将来予想から、それぞれ求めた。</p> <p>この検討に基づき、降雨のpHの低下により石灰岩の溶解は増進し、降雨量の増加によっても石灰岩の溶解は進展することを定量的に予測した。FOSM法の結果から、pHの低下が空隙率の増加に最も影響を及ぼし、続いて降雨量の増加が影響を与えることが明らかとなった。それに比して、気温の上昇による影響度は、これらより2桁小さい</p>			

ことを示した。

石灰岩の溶解により、 $H^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $H_2CO_3$ の水中濃度は上昇する一方、 $CO_3^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ の水中濃度は低下する。そして、pH、降雨量、および温度変化をすべて考慮した場合には、pHの変化が支配的な要因となることを示した。

このような石灰岩の溶解は空隙率の増大を促し、貯留量の増加につながるのに対し、地盤の安定性を低下させる一方、揚水井戸の維持管理の困難さを増大させることを明らかにした。

3. 揚水井戸における石灰岩溶出の影響について、宮古島・砂川ダムデータをを用いて解析した。砂川ダムで調査されたボーリングデータをもとに、透水係数、帯水層厚さ、有効空隙率について、地球統計学で用いられるKriging法によりその分布を推定した。その後、1994年3月から1995年5月までの450日間の降雨と気温データを用いて東西方向2km、南北方向3kmにわたる領域の解析を行った。入力となる降雨浸透については、タンクモデルにより浸透量を求めた。そして、揚水井戸はダム堤体に近い下流側に2点、それより1kmほど上流側の1点を選定して、それらの点における $Ca^{2+}$ 濃度の評価により、以下のような揚水井戸の維持管理に関する情報を得た。

まず、実測の降雨データを用いて準3次元浸透流解析を行い、地下水の流速分布を求めた。その流速分布を用いて石灰岩の溶解過程を移流分散解析でシミュレートした。参照ケースの解析結果で、降雨強度が強くなる季節以降に $Ca^{2+}$ 濃度が上昇し、下流側の揚水井戸では $Ca^{2+}$ 濃度が低くなることを明らかにした。そして、上流側でも位置によって $Ca^{2+}$ 濃度はかなり異なることを示し、場所により維持管理法の設定を変更する必要があるとした。

pHが5から4に低下した場合には、地下水中の $Ca^{2+}$ 濃度は50倍ほど上昇し、降雨の酸性化は地下ダムの運営に大きな影響を与えることを示した。

降雨強度が10%増大した場合にも、地下水中の $Ca^{2+}$ 濃度は50%倍ほど上昇することが分かった。これによりわずかな降雨強度の増大も地下ダムの維持管理には注意が必要であることが分かった。

気温が1°C上昇した場合には、結果はあまり変化なかった。これは宮古島地方の気温が年平均20数°Cであることも関係しており、このような高温地域では、わずかな気温上昇では反応定数の変化率も小さいことがその理由と考えられる。

以上のように、本論文では、地球温暖化による環境変化が地下ダムの維持管理に与える影響を定性的および定量的に明らかにした。

注)論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 words で作成し  
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

地表にダムやため池が構築できないところ、あるいは河川が発達していない島しょ部などでは、地下ダムは有効な貯水構造物である。しかし、地下ダムは通常のダムと異なり、貯留層を形成する石灰岩帯の溶解による空隙率の変化や $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の上昇が揚水井戸の維持管理に影響を与えるため、その程度を定量的に明らかにする解析手法の開発が必要となる。

本論文では、このような地下ダムの運営に地球温暖化が与える影響を検討するために、数値シミュレーションによって種々の状況を再現し、その影響を推定した。評価すべき主な点は、以下のように要約される。

1. 地球温暖化が石灰岩の溶解に与える影響を評価できるモデルを構築した。詳細な1次元モデルと実際の挙動を再現できる準3次元モデルを構築し、地球温暖化の影響が予測できる数値解析手法を新たに構築した。

2. 地球温暖化が石灰岩の溶解に与える影響を明らかにした。降雨の酸性化、降雨量の増大、気温の上昇が空隙率の変化に与える影響をFOSM法によって明らかにした。これらのうち、pHの低下が最も大きな影響を与え、降雨量の増大がそれに続き、気温の上昇はそれらより2桁以上影響が小さいことを明らかにした。また、これら3つが同時に発生した場合には、pHの低下の影響が支配的となることを示した。

3. 宮古島の砂川ダムのデータを用いて、揚水井戸の維持管理において留意すべき事項を明らかにした。宮古島で得られたデータを用いて地球統計学の手法により地盤構造を再現し、実際の降雨および気温データを用いて450日間の挙動解析を行うことにより、揚水井戸の場所によりカルシウムイオン濃度が異なることを示した。下流側では上流側よりもカルシウムイオン濃度が高くなるが、下流側でも場所により非常に異なる可能性があることを示した。また、pHが1低下すると、地下水中のカルシウムイオン濃度は約50倍に上昇し、地下ダムの維持管理が非常に困難になる可能性を示した。そして、降雨の10%の増大がカルシウムイオン濃度を約50%上昇させることを示し、降雨増大の影響も大きいことを示した。気温に関しては、宮古島のような平均気温の高い地域では、その上昇の影響が小さいことを明らかにした。

以上のように、本論文は、長期にわたる地下ダムの維持管理という観点から、それに必要な解析手法を開発し、揚水井戸の目詰まりや水質変化、空隙率に与える地球温暖化の影響を明らかにしたものであり、ダム工学並びに水資源の開発、管理・保全の実務に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成22年2月17日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。

注) Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公開可能とする日付を記入すること。  
要旨公開可能日： 年 月 日以降