

氏 名	MEBRUK MOHAMMED NURHUSEIN		
博士の専攻分野の名称	博士（工学）		
学位記号番号	博理工甲第 791 号		
学位授与年月日	平成 22 年 3 月 24 日		
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
学位論文題目	Grey-box Modeling Approach for Prediction of Hydraulic Pressure Change: An Exploration of Practical Methods (グレイーボックスモデリングを用いた地下水圧変動の予測：実用方法の検討)		
論文審査委員	委員長	教授	渡邊 邦夫
	委員	教授	桑野 二郎
	委員	准教授	小口 千明
	委員	准教授	長田 昌彦

論文の内容の要旨

Most groundwater modeling efforts are aimed at understanding the effect of a proposed action on the near by groundwater field. A groundwater field is usually characterized by its hydraulic pressure distribution. Thus, accurate prediction of hydraulic pressure is indispensable. Depending on the available prior knowledge and physical principles that relates the proposed action and the resulting hydraulic pressure change, White-box and Black-box modeling approaches have been traditionally used.

The common approach to modeling of hydraulic pressure change is to use White-box models that involve applying physical principles and results from full-scale experiments. Numerical models, because they provide the most versatile approach to hydraulic pressure prediction, have outclassed all other White-box models. However, numerical capability for representing natural real world complexity underscores the uncertainty of model input values (e.g. aquifer parameters, boundary conditions, initial conditions etc) and the corresponding hydraulic pressure predictions. It is time consuming and financially demanding to make clear these vital inputs.

Since it is usually difficult to fully understand these vital inputs to numerical models, alternative Black-box approaches for hydraulic pressure prediction have been used. These Black-box modeling approaches do not need any prior knowledge or theoretical consideration about the relationship between the proposed action and the resulting hydraulic pressure change. Due to their ability to handle highly non-linear relationships artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) are currently the most popular among the Black-box models. A major implementation advantage of ANN or ANFIS approach is that they typically use input variables that are fundamentally more accessible and less uncertain (e.g., weather conditions, inter-borehole and/or intra-borehole hydraulic pressure) than input parameters (e.g., hydraulic conductivity, storage coefficient and areal recharge) required by White-box models. A major disadvantage of ANN or ANFIS model is that they can only directly predict hydraulic pressures at locations for which they have been developed with a corresponding set of field data.

ANN and ANFIS are intolerant to situations where prediction involves out of training range values. Thus, for

prediction of hydraulic pressure change caused by an action that resulted in new hydraulic pressure field with time, these Black-box models would seldom bring about the required accuracy.

Seeking to circumvent parameter uncertainty and simplifying mathematical and physical assumptions inherent to White-box models, and incapability to predict beyond what has been observed in the Black-box models; in this study two alternative Grey-box modeling approaches are proposed. These two Grey-box modeling approaches are formed by combining the finite element method (a White-box model) with either a feedforward ANN or ANFIS. Both ANN and ANFIS are trained by the backpropagation algorithm. The general methodology for these Grey-box approaches can be summarized in three steps:

Step 1: Develop a simplified finite element modeling tool capable of predicting hydraulic pressure variation in response to a proposed action. And by assigning rough aquifer parameters predict a number of hydraulic pressure trends.

Step 2: Using the approximate hydraulic pressure trends obtained in step 1 as inputs ‘Train’ ANN or ANFIS by minimizing the residual between these inputs and the corresponding observed hydraulic pressure.

Step 3: Combine the finite element method and the trained ANN or ANFIS in parallel, i.e. using the finite element model approximated hydraulic pressures as inputs to the trained soft-computing technique the final inferred hydraulic pressure is obtained.

These Grey-box models were applied to analyze the hydraulic pressure change caused by construction of two vertical shafts at Mizunami underground research laboratory, in Mizunami, central Japan. The results obtained were indicators of a successful practical application of the proposed methodology.

Key words: *Adaptive neuro-fuzzy inference system, Backpropagation algorithm, Black-box models, Feedforward artificial neural networks, Finite element method, Grey-box models, Groundwater modeling, Hydraulic pressure analysis, Mizunami underground research laboratory, Normalization, Subsurface activities, White-box models*

論文の審査結果の要旨

本論文は、実用的な地下水環境管理システムの開発を目指して、建設工事等に伴う地下間隙水圧変動を高精度で予測する方法の開発研究を行ったものである。一般的に言って地下水管理は間隙水圧データを基礎として行われる。間隙水圧の観測値と予測値を比較する事によって、異常な変動の発生を把握し適切な対応を取ることが管理システムの主眼点である。ここで問題となるのは、異常が無い場合の間隙水圧変動を高精度で予測する事である。従来、この予測はモデル化された地盤・岩盤内の地下水流動の基礎式を有限要素法などによって計算することによって行われてきた。いわゆる地下水解析である。しかしながら、地下水流動の場、とくに割れ目の多い岩盤などは地質的な不均質性・不確実性が大きく、正確なモデル化は事実上不可能である。そのため、計算された任意点の間隙水圧は実測値とかなり異なっている事が一般的である。計算した予測と実測が大きく異なれば、その予測値を地下水管理に用いる事ができない。本研究は、従来用いられてきた地下水解析とソフト・コンピューティング手法とを組み合わせたグレー・モデルにより予測精度を飛躍的に高める研究を行い、その成果を取りまとめたものである。研究の中で、実測データを用いた解析を丹念に行った。

本論文では、研究成果を7章に分けて記述している。

第1章では、グレー・モデルの考え方を、地下水解析による方法（ホワイト・モデル）と遺伝的アルゴリズム（GA）や人工ニューラルネットワーク（ANN）などによる解析方法（ブラックボックス・モデル）と対比して説明している。また、各モデルに関する従来の論文のレビューを行っている。

第2章では、本研究で開発した、有限要素法とソフト・コンピューティング手法とを総合化した新しいグレー・モデルの構造について述べている。その方法は、種々の水理地質モデルに対して解析された間隙水圧変動を入力して、ソフト・コンピューティング手法を通して実測データに併せて予測する事である。

第3章では、本研究の主な解析対象地域である岐阜県、瑞浪市に建設されている超深地層研究所の建設について説明している。当該地域の地質や水理的性質を記載した上で、同研究所の2つの立坑掘削に伴って低下した周辺の間隙水圧変化を研究対象として用いる事を述べている。また、間隙水圧測定場所やその測定精度についても記述している。

第4章では、瑞浪市に建設されている超深地層研究所周辺の地下水流動の有限要素法解析について述べている。とくに、境界条件の設定方法や、解析に用いた水理地質モデルについて詳述している。水理地質構造モデルについては、当該地域の地質を下部の花崗岩と上部の堆積岩の2層モデルとしている。このモデルはかなり粗いものであるが、実際の調査ではモデルの不確実性が大きい事を考えて設定したものである。その地質モデルに、いくつかの想定しうる透水係数などの分布を設定し計算した。

第5章では、研究で用いたソフト・コンピューティング手法、とくに、ANNとANFIS（Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System）の理論とその特性について詳述している。また、取り扱うデータの正規化について研究結果を記述している。データの正規化は、間隙水圧の予測において重要となり、この点について新しい方法を提案している。

第6章では、解析結果について述べている。まず、有限要素法解析では実測間隙水圧変動の予測が、いくつかの地質構造モデルでは十分な精度でできなかった事を述べている。次にそれらを入力としたANNやANFISを用いる事により、高精度で間隙水圧予測が可能となる事を示した。また、ANFISモデルの方がANNに比べて高い精度で解析できる事を明らかにした。

第7章は結論及び今後の発展方向について記述している。その中で、本研究で提案したグレー・モデルの精度が極めて高く、地下水管理システムに適用できる事を示した。

本研究では、有限要素法に代表される解析と ANN や ANFIS を組み合わせる事によって、多くの不確実性を持つ岩盤を対象にして極めて高い精度で長期間の間隙水圧変動が予測しうる事を明らかにした。その点で研究の独創性、新規性、発展性が大きい。また、その結論を導く過程で行った解析の厳密性も高く評価される。それらの点を総合的に判断して、博士の学位論文として合格と判定した。