

学 位 論 文 の 要 旨

3次元浸透流解析による地下水排水影響の予測手法の高度化に関する研究
(Study on advancement of prediction method of groundwater drainage effect by 3D seepage analysis)

氏 名 細野 賢一

近年、大型台風の通過や突発的な集中豪雨が頻出する傾向が見られ、全国各地でこれまでの記録を大幅に上回る降水量が観測されている。降水量の一部は地下に浸透し、地下水位の上昇を引き起こす。これによって地盤の有効応力が減少し、斜面の不安定化をもたらすことで斜面土砂災害の危険性が高まりを示す。また、地下水の存在が引き起こすもう1つの災害場面として、トンネルに代表される地下空間を利用した建設工事が挙げられる。地下空間では建設作業が大きな水圧を持つ地下水面下の環境で行われるため、切羽の崩落や大量の坑内湧水量の発生など、工事の安全性を脅かす危険性がある。

地すべりや地下空間の建設工事に共通する課題は、対策を検討するために降雨や掘削による水位の変動を正しく予測することであり、これに対しては3次元浸透流解析を適用することが1つ有効な手法である。3次元浸透流解析は、コンピュータ技術の発展とともに、取扱える節点数も増加し、より精緻なモデルを構築することが可能となった。しかし、複雑な地層構造の中に排水ボーリングやトンネル構造といった地下水排除工を反映したモデルを構築することは、現在でも多大な労力であり、これを忠実にモデリングした場合、節点総数が増加することで、解析時間を長引かせ、速やかに解析結果を提示したい場面での採用が難しい。これが3次元浸透流解析の課題である。

そこで、地下水排除工をモデル化せずとも、その効果を解析できる「仮想ドレーンモデル」と称する浸透流解析手法を考案した。本研究では、仮想ドレーンモデルの実際の現場での実用性を確認することを目的として、①「従来の浸透流解析で求められた解析解との比較」、②「実現場の計測データとの比較」を行った。なお、実現場は、国土交通省の直轄地すべりである譲原地すべりと九州新幹線の木場トンネルの現場データを収集した。

従来の浸透流解析手法との比較においては、排水量に関して高い近似度を示し、地下水低下の影響範囲も同等になることが示された。また、従来の浸透流解析手法では、トンネルが掘進していく問題に対し、進行方向のモデルサイズの粗密が結果に大きく影響する結果となっていたが、仮想ドレーンモデルは、その影響を受けないことがわかった。したが

って、トンネル掘削が透水性の異なる地層に差しかかった際、地盤の透水性に応じた排水量の傾向の変化を適切にとらえることができ、これは仮想ドレーンモデルの利点であることを示した。

実現場での仮想ドレーンモデルの検証に際しては、まず、排水対策やトンネル掘削が実施される前の事前水位をターゲットにして透水係数等の入力パラメータの感度解析を行い、相関性の高いパラメータを同定した。

この最適化されたパラメータを用いて、譲原地すべりでは、各抑制工の排水ボーリングを仮想ドレーンモデルで表現して解析を実施した。この時、譲原地すべりで実施された抑制工の対策履歴を3つの期間に区分し、それぞれの期間で低下を示した基底水位や実測排水量に対して、仮想ドレーンモデルで予測した解析結果と照査した。この結果、水抜き効果による水位低下挙動を各期間に対して追従する結果が得られ、排水ボーリングからの排水量に関しても、総量が一致する結果が得られた。しかし、水位の再現性が不十分な観測孔もあり、局所的な水理地質構造をモデルに反映する必要性を示唆した。

木場トンネルを対象とした検討においては、トンネル本体を仮想ドレーンモデルで表現して、実測の坑内湧水量との比較を行った。掘削工程は実際の工事記録を忠実に設定した。この結果、仮想ドレーンモデルによる坑内湧水量の予測値は実測に対して精度の高い結果を得た。この背景には、木場トンネルでは原位置透水試験により、帯水層の透水係数が複数個所で得られており、この試験結果に基づいて事前水位の感度解析から透水係数を最適化できたことにあると考察した。したがって、仮想ドレーンモデルは現場の水理地質構造が適切にモデル化されている条件においては高い予測精度を示すことがわかった。

以上の検証により、仮想ドレーンモデルは、実際の現場での適用に対して、実用性を有している結論を得た。また、得られた解析結果を水抜き対策や掘削工事に伴う周辺環境への水位低下影響範囲として可視化して示した。このような可視化技術を組み合わせることで、対策の達成度や地下水保全に関する知見を視覚的に得られることを考察した。仮想ドレーンモデルは、現場で得られた新たな地質情報や計測データを用いて、速やかに予測結果を更新できる利点があり、予測結果を踏まえて今後の工事に役立てていく、情報化施工をより身近なものにする解析技術であることを述べた。

学 位 論 文 の 要 旨

3次元浸透流解析による地下水排水影響の予測手法の高度化に関する研究
(Study on advancement of prediction method of groundwater drainage effect by 3D seepage analysis)

氏 名 細野 賢一

Recently it has been observed that Japan is struck more frequently by large typhoons and sudden heavy rainfalls, with precipitation far exceeding previous records in many parts of the country. A part of the precipitation infiltrates into the ground, causing the groundwater table to rise. This reduces the effective stresses of the ground and leads to slope instability, thereby increasing the risk of landslide disaster. Another groundwater-induced disaster scenario is associated with construction of underground structures, such as tunnels. The underground construction is carried out in an environment below the groundwater table with high water pressure, which poses risks to construction safety, such as face collapse and large amounts of groundwater inflow.

A common issue for construction work in landslide areas and underground is to accurately predict water level fluctuations caused by rainfall and excavation in order to design measures, for which one of the effective methods is the application of three-dimensional (3D) seepage analysis. With the advancement of computer technology, the number of nodes being processed in 3D seepage analysis has increased, making it possible to construct more sophisticated models. However, building models including drainage works such as drainage boreholes and tunnel structures in complex geological formations is still time-consuming. Detailed modelling results in increase in the number of nodes, which increases the analysis time, and makes it difficult to apply the method in situations where analysis results need to be presented promptly. This is the challenge of 3D seepage analysis.

To address above issues, a seepage analysis method called the “virtual drain model” was developed to analyze the effects of groundwater drainage works without modelling them. In this study, the applicability of the virtual drain model in the field was verified by (i) comparing it with the analysis results obtained by conventional seepage analysis, and (ii) comparing it with the measured data collected in the field. The field data were collected from the Yuzurihara landslide area, the site for the landslide control project

directed by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and the Koba tunnel site of the Kyushu Shinkansen.

Comparing the results between the conventional seepage analysis methods and the virtual drain model, a high degree of agreement was found in the volume of groundwater discharge and the extent of area affected by groundwater drawdown. It was also found that in the case of tunnel excavation, the results of conventional seepage analysis methods were significantly influenced by the density of the model grid-size in the excavation direction, whereas the results of the virtual drain model were unaffected. This is an advantage of the virtual drain model, as it means that when tunneling passes through geological formation with varying hydraulic conductivity, changes in the discharge according to the hydraulic conductivity of the ground can be sufficiently simulated.

For the validation of the virtual drain model applied in the field, a sensitivity analysis of input parameters such as hydraulic conductivity was first carried out for the preliminary water table before the implementation of drainage works and tunnel excavation, and then highly correlated parameters were identified.

Using these best-fit parameters, the virtual drain model was used to simulate the drainage boreholes of each of the control works in the Yuzurihara landslide area. The history of the control works in the Yuzurihara landslide area were divided into three periods, and the analysis results predicted by the virtual drain model were cross-checked against the base groundwater level decreasing in each period and discharge measured in the field. The analysis results showed that the groundwater level drawdown due to the drainage effect was observed for each period, and the total volume of discharge from the drainage boreholes was also consistent. However, water levels in some boreholes were not adequately simulated, suggesting the necessity to incorporate the local hydrogeological structure into the model.

In the study of the Koba Tunnel, the virtual drain model was used to simulate the tunnel excavation, and the groundwater inflow rate was compared with field measurements. The excavation process was accurately simulated according to the actual construction records. As a result, the groundwater inflow rate in the tunnel predicted by the virtual drain model was highly accurate with respect to the field measurements. This was presumably because the hydraulic conductivity of the aquifer was obtained at several locations in the Koba Tunnel through in-situ hydraulic conductivity tests, and based on the results of these tests, the hydraulic conductivity was optimized through sensitivity analysis of the preliminary water table. Therefore, the virtual drain model was found to have high prediction accuracy under conditions

where the hydrogeological structure of the site was modelled sufficiently.

It is concluded that the virtual drain model has a practical applicability in the field according to the results of the above verification. The obtained analysis results were also used to visualize the surrounding area affected by the water table-drawdown due to implementation of drainage works and excavation. By combining these visualization techniques with the results of the virtual drain model, it is possible to visually obtain information on the performance of countermeasures and knowledge on groundwater conservation. With the virtual drain model, the analysis results can be updated promptly using new geological and measurement data collected in the field, making information construction method more accessible, where prediction results are utilized for subsequent construction step.