

京都大学	博士 (工 学)	氏名	Tangjarusritaratorn Tanawat
論文題目	An implementation of soil particle transportation concept for internal erosion simulation and its application to vertical shaft construction (内部侵食シミュレーションのための土粒子輸送概念の実装と立坑掘削問題への適用)		
(論文内容の要旨)			
<p>都市部での深部地下開発を行う際、施工のためあるいは供用後の維持管理・避難坑として立坑が設けられる。都市部での大深度立坑建設では、既設構造物への地盤沈下を懸念するため、地下水位を低下させずに高水圧下の工事となる。しかしながら、地質構造の不均質性と立坑掘削に伴う局所的な圧力勾配が生じ、局所的な浸透流が発生し、パイピングや盤ぶくれが発生する。さらに、局所的な流れは地盤材料の浸食を引き起こし、土留め壁の変形などが生じ立坑構造物の不安定化を促進する。本論文は、地盤中に発生する局所的な地下水流動とそれに伴う浸食挙動を解明するための浸食モデルの提案とそれを用いたシミュレータの構築、そのシミュレータの適用性を既往の室内実験や模型実験を用いて実施したもので、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景と方向性について示している。地下水位を低減できない都市部において大深度立坑を建設する際、地盤の不均質性や局所的な水圧差に伴う浸透流が発生する。それによって、局所的な地盤の浸食、変形・破壊が生じるが、現状の土-水連成解析では、そのような現象を予測できないため、地盤の内部浸食をシミュレートできるモデルの構築とそれを実装したシミュレータ開発の必要性を説明し、本研究の工学的必要性を述べている。</p> <p>第2章は既往の研究について要約している。地下水位の高い都市部での立坑建設事例の中で、特に、浸透流によって浸食が発生する施工上の不具合事例を示し、浸食の考慮した検討の必要性を述べている。また、従来用いられてきた浸食モデルとその限界を示し、浸食を考慮する際に議論すべき屈曲度、抗力、抗力係数、粒子輸送などの各項目について既往の研究をレビューし、本研究で議論すべきポイントを整理し示している。</p> <p>第3章は、有限差分法を用いた立坑の逐次掘削過程を土-水連成解析でシミュレーションしている。解析は、Cam-Clayの破壊規準を用いて弾塑性解析を行い、浸透流はダルシー則に従う。解析結果では、土留め壁に作用する土圧と変形を示し、実現場で計測される結果や理論解と比較し、力学的な解析の妥当性を示している。また、掘削面の盛り上がり（盤ぶくれ）が生じていることを示している。浸透流は、掘削面周辺で上向きの浸透速度が大きい流れが集中すること、掘削に進展に伴い急激に高速な流れが掘削面周辺に作用することを示し、これらの現象が内部浸食を引き起こす可能性を示している。しかしながら、本章で用いられている土-水連成解析では、浸透流に起因する浸食伝播は考慮されておらず、第2章で示した実現場で生じるパイピングや盤ぶくれは、十分に表現できていないことも説明を行っている。</p> <p>第4章は、浸透による土粒子の浸食モデルを構築し、1次元の浸食に関するシミュレータの開発を行っている。既往の研究では、何らかの実験を行い土粒子の浸食に関するパラメータを設定してシミュレーションが行われてきた。ここでは、可動しない土粒子と可動する粒子を分けて考え、可動する粒子輸送は、抗力を考慮した運動方程式で記述している。可動しない土粒子と可動する粒子の分離は、粒子に作用する抗力</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	Tangjarusritaratorn Tanawat
<p>と浸透流から判定を行っている。浸食モデルは、粒子の輸送を移流方程式で説明し、ふるい分け試験で分類される粒子サイズ毎の土粒子の輸送を計算することから一種の多相流流れとなっている。提案された浸食モデルの妥当性は、重力、浮力および抗力に着目し検証が行われた。検証には Ke &amp; Takahashi (2014)の実験研究を用い、解析の妥当性と浸食挙動について議論を行っている。実験は2種類の粒径の異なる砂をブレンドした材料で実施されており、解析は実験で示されている浸透流の速さと別の速さで行われた。結果として、浸食（粒子移流）が発生する流速は、実験結果より解析の方が小さく、低流速において微細な粒子が、元の接触状態から離脱するように動き出したことになる。そのため、解析では実験よりも早く微細な粒子が動き出すため、解析領域の下流側では、早い段階で微粒子が洗い流されている。実験と提案される解析は、最終的な状態（定常状態）ではよい相関性を示すが、浸食の開始とそれに伴う微細粒子の流出に差異が生じることを示している。</p> <p>第5章は、圧力水頭に応じて流体の流れを変化させ、浸食による土粒子輸送を考慮した粒子-流体連成シミュレーションを実施している。このシミュレーションでは、ダルシーの法則を適用した連続の式を使用して間隙水圧の計算を行っている。解析では、スタッガード格子を用いており、圧力は要素の中心に配置され、粒子や流体の速度と密度は節点に配置するようにして計算を行っている。実施に浸食が発生すると、透水係数だけでなく空隙率の変化が発生する。そこで、気孔率/浸透率の計算が浸食スキームに導入して連成シミュレーションを行っている。シミュレーション結果では、流動初期では細かい粒径の土粒子の浸食は、非線形な挙動を示し、これは、流速が浸食に伴い徐々に変化するためである。一方で、流れが定常状態になれば、細かな土粒子の浸食は、線形的で生じることを示している。第4章の検討と調和的な結果を示している。</p> <p>第6章は、浸食による土粒子輸送を考慮した粒子-流体連成シミュレーションを2次元問題に適用した事例を示している。さらに、矢板周りの浸透模型実験や第3章で扱った立坑の掘削施工時での浸食発生の可能性について、第5章で提案した連成シミュレータを2次元に拡張して適用し、検討を行っている。シミュレーションを実施する前に、移流方程式を離散化するために使用してきた風上スキームは、ここで取り扱う2次元問題には適切でない可能性があることを示し、Lax-Friedrichsスキームを用いてシミュレーションを行っている。幅40m、深さ40mの立坑に対して、第3章で得られた間隙水圧分布を参照して境界条件を設定し、シミュレーションを実施している。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、都市部での大深度立坑掘削時に発生するパイピングや盤ぶくれ現象と局所的な土粒子の浸食現象を関連づけ、土粒子の浸食モデルの提案と検証、浸食による土粒子移流を考慮した粒子-流体連成シミュレーションの構築および模型実験への適用を行った成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 浸食モデルは、粒子の輸送を移流方程式で説明し、粒子サイズ毎に土粒子の移流・浸食を考慮するモデルの提案を行った。土粒子の移流を粒子サイズ毎に計算するため、粒子サイズ毎の多相流流れとなっている。
2. 既往の実験結果に提案する浸食モデルを適用し、最終的な状態（定常状態）ではよい相関性を示すが、低流速において微細な粒子が、元の接触状態から離脱するように動き出し、早い段階で微粒子が流出することを示している。
3. 浸食による土粒子移流を考慮したモデルを援用し、2次元粒子-流体連成シミュレーションを提案した。
4. 提案された2次元粒子-流体連成シミュレーションでは、流動初期では細かい粒径の土粒子の浸食は非線形な挙動を示し、流れが定常状態になれば、細かな土粒子の浸食は線形的であることを示している。
5. 施工中の立坑や矢板周りの浸透問題に2次元粒子-流体連成シミュレーションを適用し、土粒子の浸食と浸透挙動により構造物の不安定化が説明可能であることを示している。

以上より、本論文は、都市部での大深度立坑掘削施工時に構造物が不安定化する要因であるパイピングや盤ぶくれ現象を浸透挙動とそれに伴う土粒子の浸食で説明することを提案し、提案するモデル・シミュレータの適用性を検証したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年8月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。