

氏名	ふくだ つよし 福田 毅
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第181号
学位授与年月日	平成17年 3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	岩盤内円筒空洞の3次元応力・変形解析に関する研究
学位論文審査委員	(主査) 木山英郎 (副査) 榎明潔 井上正一 西村強

## 学位論文の内容の要旨

近年、地盤・岩盤工学の分野における研究に目を向けると、代表的な研究対象として次のようなものが挙げられる。それは、地下環境特性の積極的利用を目的とする地下空間利用や社会基盤整備、あるいは高レベル放射性廃棄物の深地層処分等といった岩盤内施設、すなわち地下深部の空洞施設開発プロジェクト等が日本のみならず、諸外国においても活発に研究されている。そこで、地盤・岩盤工学的観点から地下の円筒空洞に対する数値解析について考える。

まず、地下空洞の支保という観点からこれまでの施工事例について取り上げる。上記のような深地層処分における地下深部の円筒空洞、あるいは立坑や橋梁基礎等の事例に代表される溝状の円筒空洞に対しては、連続地中壁を基本概念する構造体が数多く見受けられる。しかしながら、近年における上記のような円筒空洞の支保に関する事情をみると、構造物の大規模化に伴う円筒空洞断面の大型化・大深度化が進み、鋼管や場所打ちコンクリート杭を用いた新しい施工法が数多く提案されている。しかし、このように施工法の多様化が進む一方で、群杭の設計や施工時において工学的判断を下す際の基礎資料となる確かな数値解析法が無いという問題も存在する。

そこで、本研究ではまず、都市部の未固結・帯水地山における大断面トンネルの新施工法として開発された積層導坑トンネルの木山らによる2次元数値解析手法を基に、群杭の3次元変形挙動解析手法の開発を試みた。詳細については第2章に記述しているが、その概略を述べると以下のようなものである。場所打ちコンクリート杭を想定した杭を連続的、かつ直線状に配置させたケース、および円形・矩形に配置させたケースを解析モデルとして、杭間の荷重伝達を表現する数値解析手法の提案を行った。その手法とは、杭をはり要素としてモデル化し、杭間の不連続面において、せん断変形により生じる杭間の接触相対変位から算定される接触力を外力として、杭に再載荷することで荷重伝達を表現する方法である。一般に、不連続体解析ではジョイント要素(接合要素とも呼ばれる)を定義することで不連続面を表現するが、本手法ではこのような要素を考慮せず

とも、不連続面における荷重伝達を表現できる点に特徴がある。結果として、第2章で提案した解析手法により杭間の荷重伝達を表現するに至った。さらに、この荷重伝達により群杭構造体の剛性が向上する様子も表現することができた。

次に、静水圧状態下として仮定できる地下深部の円筒空洞周りの地盤変形解析に着目する。なお、地下空洞(トンネル)と立坑は、トンネル軸の方向は異なるが、空洞周辺における地盤内の応力状態は同じパターンの重ね合わせで同様に解析できる。円筒空洞周りの地盤変形解析および応力解析では、周辺地盤のゆるみの進展やその影響を及ぼす範囲を明確にする必要がある。さらに、地下深部においては飽和・不飽和の状態の間隙水の存在が予測されるため、地盤内の浸透流による有害物質の拡散、あるいは浸透力による空洞の不安定化等の問題が予想される。また、これらの空洞周辺に生じる現象は、切羽近傍においても同様に検討される必要がある。

そこで、本件研究では、まず第3章に円孔周りにおける弾塑性解析解の定義を行った。すなわち、理想的な応力-ひずみ関係を定義することにより、円孔周りの基礎的な弾塑性解析解を定義した。この基礎的な解析解から本解析手法である軸対称弾塑性有限要素解析手法の適合性について、地山特性曲線を適用することで検討を行った。さらに、切羽を有する円筒空洞モデルを用いて、切羽の及ぼす影響について検討を行った。結果として、第3章では、その適合性について明確にするとともに、切羽の及ぼす影響について基本的な知見を得た。続いて、第4章では、前章と同様の解析モデルを用いて、間隙水を考慮したケース、および間隙水を考慮しないケースについて検討を行った。これは、間隙水を考慮することで間隙水が空洞周りに及ぼす影響について明らかにすることを目的としている。そこで、まず前章で定義した軸対称弾塑性有限要素解析手法に対し、新たに非排水弾塑性構成式の導入を行った。これにより、空洞周辺に発生する間隙水圧の発生状況を示すに至った。つまり、第4章の結果として、塑性領域において間隙水の及ぼす影響を明らかにすることができた。

以上、地下空洞の数値解析として、地下トンネルや立坑を念頭においた円筒空洞の支保の役割を果たす群杭井筒基礎、およびその周辺地盤の応力・変形解析について、数値解析手法の提案を行い、得られた知見について述べてきた。これらは、地下空洞の設計や施工時に活用できる基礎的な指針、工学的判断を下す際の定量的な検討資料の提供を目的としてきたもので、その役割を十分に果し得たと信ずる。以上から、本研究では地下構造物の合理的な設計法や施工法の一助となるものと考えている。

## 論文審査の結果の要旨

大都市部地下の大断面トンネルを始め、大型構造物用の複合井筒基礎や高濃度放射線廃棄物処分空洞など近年の最先端地下構造物は、軟弱地盤や超深度で地下水影響を考慮する場合とか、大断面、高荷重、高熱化や超長期耐久性など次々と設計・施工上の難問を課してくる。当然のことながら、これらの要望に応じて新しい概念や工法も次々と編み出されてくる。たとえば大断面掘削に共通する最近のアイデアとして、井筒の場合は $\phi 1\text{m}$ ほどの場所打ちコンクリート杭を、直

径 20m とか 50m とかの円筒様形状になるように必要数並べ打ちして、まずは地盤中に大断面井筒の側となるコンクリート壁を作ってから、中を掘削するのである。同様に、20m x 50m 級の大断面トンネルの場合は、杭の代わりに小口径シールドトンネルを並べて掘って、コンクリートで埋め戻して側にする等である。

そこで問題になるのが、これら大断面地下構造物の設計をどうするかである。詳細設計は別として、計画段階から概略設計の段階では、検討すべき物性値や影響因子、条件因子が多数あるので、それらの測定精度から言っても、また必要な解析ケース数から見ても、取り扱いが簡便で、処理時間が短くて、軸方向 3 次元特性を含み、実用的精度を満たす数値解析プログラムが望まれるわけである。

本論文では先ず、面外せん断を中心に 3 次元地圧下の井筒の杭間の荷重伝達を表現するのに、杭をはり要素とし、DEM に習って杭間の接触相対変位から算定される接触力を用いることを考えた。リング状群杭からなる井筒構造の期待通りのせん断剛性の発現性など、開発された 3 次元解析プログラムは十分な実用性を示した。

つぎに、周辺地盤の応力、変形状態を解析するため、地盤をひずみ軟化型の弾塑性体に仮定し、空洞は切羽を有する円形トンネルで代表し、汎用の弾性軸対称体の 3 次元有限要素解析手法を一部修正して近似計算法とすることを考えている。地盤の塑性域における非線形性の克服が課題である。得られた結果は 3 次元応力分布性状、塑性域の進展性状、および地山特性曲線で評価され、簡便性、迅速性、軸方向の 3 次元変化表現、解析精度、いずれも所期の目的を達成している。

最後に間隙水が及ぼす影響を比較的簡単に解析するため、上記の軸対称弾塑性有限要素解析プログラムに対し、非排水弾塑性構成式の導入を図っている。これにより、空洞周辺の間隙水圧の発生状況や塑性領域に及ぼす影響を明らかにできることが示された。

以上のように、多様化して行く地下の大断面円筒状空洞の計画・設計上で今最も望まれている、簡便で使い易い 3 次元弾塑性解析プログラムの開発に一つの道筋を示したものと認め、この分野の今後の発展に大いに寄与する成果として博士（工学）の学位論文に値すると判定する。