

博士(工学) 藤井利侑

学位論文題名

円形立坑への作用土圧と周辺地盤の挙動に関する研究

学位論文内容の要旨

地下空間の利用には、そのアクセスとしての立坑は必須の施設で、これを安全かつ、経済的に計画、設計、施工することは極めて重要である。しかし特に近年深い立坑で実施例の多い円形立坑に関して、施工事例は既に掘削深さ73mにも達しているが、その設計に用いる土圧の適用性は未だ十分に検証されていない。深い円形立坑の設計土圧は立坑周辺地盤の3次元的挙動に支配されると推定されるが、実際には、土圧を深さ方向に直線的に増加する従来の2次元の土圧理論に基づき設計している。そこで、本研究では、円形立坑に作用する土圧を実験的、解析的に研究し、円形立坑に作用する土圧と周辺地盤の挙動に関して明かにし、合理的設計手法の確立に寄与することを目的としている。

本研究では、複雑な特性を示す立坑周辺地盤の挙動と立坑に作用する土圧を、近時広く地盤解析の分野で応用されている遠心模型実験装置と、FEM解析を有効・的確に利用して解析している。

本論文は全7章から構成されている。

第1章は序論で、既往の研究を総括するとともに本研究を行った背景と本研究の位置づけを述べている。

第2章では地下空間利用の歴史と現状を整理し、我国における将来の都市地下空間の必要性を展望している。地下空間へのアクセスとしての立坑は掘削深さが50mを越えるものがすでに20例近く施工されている。今後ますます地下空間利用が活発になると考えられ、合理的で安全な設計施工技術面での研究が急務であることを明らかにしている。

第3章では、立坑に関する現状の設計基準(指針)を整理し、特に設計土圧に関する課題を指摘している。現在我国にある各種山留めの設計に係わる基準、指針のうち、深い円形立坑に適用されているのは「地中送電用立坑・とう道の調査、設計、施工、計測指針(日本トンネル技術協会)」である。この基準は他の基準と異なり、立坑の構造解析は3次元解析を提案しているが、設計土圧は十分な根拠に基づくものではなく今後の研究に期待するものとして、従来の2次元的土圧によっている。このような背景の下で、現行の設計土圧の見直しと、地下空間の合理的設計手法を確立するための本研究の有用性と意義を位置づけている。

第4章では、立坑に作用する土圧と周辺地盤の挙動を明らかにするために行った実験的研究の成果をとりまとめている。一連の模型実験は、ビーム型遠心模型実験装置を利用したもので、これにより重力場での実験と異なり、地盤の自重による影響を適切に考慮した考察が可能となる。実験は2つのシリーズを実施している。第1のシリーズは、剛性の高い立坑模型を強制的に内側へ変位させることによって掘削時の立坑の挙動を再現し、第2のシリーズでは実際に近い剛性の立坑模型を用い、立坑内の砂を除去することにより立坑掘削過程を再現している。

実験の結果、以下の事実が明らかになった。

- (1)円形立坑の掘削に伴う周辺地盤の挙動を的確に再現することにより、乾燥砂中で立坑周面に作用する静止土圧、主働土圧、主働状態時の地盤破壊形状を捉えることができた。
- (2)静止土圧係数は、密な地盤ではJakyの静止土圧に近く緩い地盤ではそれより小さい。
- (3)円形立坑に作用する主働土圧は、立坑の変位が大きい場合はRankineの土圧に比べて小さく、Berezantzevの提案値に近づく。実際の立坑では壁剛性により変位が制限され、土圧はBerezantzevとRankineによる値の中間となる。
- (4)円形立坑周辺地盤の破壊パターンは、立坑上部ではRankineの理論に基づくすべり線に沿った滑動が観測され、立坑中間部では立坑壁面の近傍で地盤が剛体的に下方へ動き、その下部では地盤は立坑下端へ向かうすべり面の沿って生じている。
- (5)地盤のすべり破壊パターンは応力レベルの影響を受け、立坑が深くなるほど立坑周辺部の近くで発達する。
- (6)主働時土圧分布と地盤内応力分布は、周辺地盤のすべり形状と密接に関係している。
- (7)立坑の剛性が同じであれば、作用土圧に及ぼすアスペクト比の影響は小さい。

第5章では、弾塑性FEMにより解析的に研究した成果をとりまとめている。その目的は、実験的研究と解析のクロスチェックにより研究の信頼性を高めること、実験的研究では困難なパラメトリックスタディを実施すること、および実験では装置上制約のある条件についての解析を実施することにある。一連の研究より明らかになった成果の要点は以下の通りである。

- (1)弾塑性FEM解析より得られた結果は本研究の遠心模型実験結果を良く近似し、本研究で実施した解析的および実験的研究の妥当性が検証された。
- (2)土圧分布に及ぼす壁面摩擦の影響は小さい。
- (3)FEM解析より推定した深さ20mを越える立坑に作用する主働土圧は、Rankineの主働土圧係数より求めた土圧より小さく、直線的に増加する。この理由は、深さ20m程度を境として、立坑周辺地盤内の半径方向主応力（作用土圧）に対する周方向主応力の比が小さくなるためと考えられる。

第6章では筆者が計画、設計、管理に携わった最近の事例立坑の設計について述べ、変位、土圧の実計測結果を、既往の研究結果を比較参考して評価した。実際の変位量、変位モードとも設計値と異った結果が得られた。土圧は、掘削底以浅では設計土圧としたRankine土圧に比べてやや大きく、それより深い部分では小さい値となった。また立坑に作用する同一平面上における土圧の分布は、従来の設計で仮定していた変動幅に比べて著しく大きいこと等が明らかとなり、立坑土圧を適切に予測する手法を確立するには、今後の研究が必要であるとされた。

第7章は本研究の総括で、確認と検証がなされた成果について整理と要約を行い、今後に残された課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主査 教授 土岐 祥介
副査 教授 角田 輿史雄
副査 教授 三田地 利之
副査 教授 石島 洋二

学位論文題名

円形立坑への作用土圧と周辺地盤の挙動に関する研究

地下空間の利用には、そのアクセスとしての立坑は必須の施設で、これを安全かつ経済的に計画、設計、施工することは極めて重要である。しかし近年深い立坑で実施例の多い円形立坑に関して、施工事例は既に掘削深さ 70 m以上にも達しているが、その設計に用いる土圧の評価方法はまだ十分に確立されていない。深い円形立坑への作用土圧は周辺地盤の 3 次元的挙動に支配されることを明らかであるが、実際には、深さ方向に直線的に増加する従来の 2 次元土圧理論に基づき設計している。そこで、本研究では、円形立坑に作用する土圧と周辺地盤の挙動との関係を実験的、解析的に明らかにして、合理的設計手法の確立に寄与する知見を得ている。

本論文は全 7 章から構成されており、章毎に得られた成果を以下に要約する。

第 1 章は序論で、既往の研究を総括するとともに本研究を行った背景と本研究の位置づけを述べている。

第 2 章では地下空間利用の歴史と現状を整理し、我国における将来の都市地下空間の必要性を展望している。地下空間へのアクセスとしての立坑は掘削深さが 50 mを越えるものがすでに 20 例近く施工されている。今後ますます地下空間利用が活発になると考えられ、合理的で安全な設計施工技術面での研究が急務であることを明らかにしている。

第 3 章では、立坑に関する現状の設計基準・指針を整理し、特に設計土圧に関する課題を指摘している。さらにその上で、現行の設計土圧の見直しと、地下空間の合理的設計手法を確立するための本研究の有用性と意義を位置づけている。

第 4 章では、立坑に作用する土圧と周辺地盤の挙動を明らかにするために行った、遠心模型実験装置による実験的研究の成果をとりまとめている。実験は 2 つのシリーズを実施している。第 1 のシリーズは、剛性の高い立坑模型を模型地盤内で発生する水平土圧により内側へ変位させることによって掘削時の挙動を再現し、第 2 のシリーズでは実際に近い剛性の立坑模型を用い、遠心場で立坑内の砂を除去することにより実際の掘削過程を再現して、周辺地盤の挙動と立坑に作用する土圧を観察・計測している。

実験の結果、以下の事実を明らかにしている。

- (1) 静止土圧係数は、密な地盤では Jaky の静止土圧に近いが、緩い地盤ではそれより小さい。

- (2) 円形立坑に作用する主働土圧は、立坑の変位が大きい場合は Rankine の土圧に比べて小さく、Berezantzev の提案値に近づく。実際の立坑では壁剛性によって変位が制限され、土圧は Berezantzev と Rankine による値の中間となる。
- (3) 立坑上部では Rankine の理論に基づくすべり線に沿った滑動が観測され、立坑中間部では立坑壁面の近傍で地盤が剛体的に下方へ動き、その下部では地盤は立坑壁面下端へ向かうすべり面に沿って滑動する。
- (4) 地盤のすべり破壊パターンは応力レベルの影響を受け、立坑が深くなるほど立坑近傍で発達する。また、主働時土圧分布は、周辺地盤のすべり形状と密接に関係している。
- (5) 作用土圧と Berezantzev の提案値との比は、アスペクト比の影響をほとんど受けない。

第 5 章では、弾塑性 FEM による解析結果をとりまとめている。その目的は、実験的研究と解析のクロスチェックにより研究の信頼性を高めること、実験では困難なパラメトリックスタディを実施すること、および実験的研究では装置上制約のある条件についての解析を実施することにある。一連の研究より明らかになった成果の要点は以下の通りである。

- (1) 弾塑性 FEM 解析により得られた結果は本研究の遠心模型実験結果とよく近似し、本研究で実施した解析的および実験的研究の妥当性が検証された。
- (2) 土圧分布に及ぼす壁面摩擦の影響は小さい。
- (3) FEM 解析より推定した深さ 20 m を越える立坑に作用する主働土圧は、Rankine の主働土圧係数より求めた土圧より小さく、直線的に増加する。この理由は、深さ 20m 程度で立坑周辺地盤内の半径方向主応力(作用土圧)に対する周方向主応力の比が小さくなるためとしている。

第 6 章では著者が計画、設計、管理に携わった最近の事例立坑の設計について述べ、変位、土圧の実計測結果を、既往の研究結果を比較参考して評価している。実際の変位量、変位モードとも従来の設計方法から得られる結果と異なり、さらに立坑上半部では、土圧は設計値に対して変動幅が大きく、下半部では設計値より小さい値となったことを示している。また、立坑に作用する同一平面上における土圧の分布は、従来の設計で仮定していた変動幅に比べて著しく大きいこと等が明らかとなり、立坑土圧を適切に予測する手法を確立するには、今後の研究がさらに必要であると述べている。

第 7 章は本研究の総括で、得られた成果について整理と要約を行い、今後に残された課題について述べている。

以上のように、本論文は円形立坑に作用する土圧と周辺地盤の挙動について、実験的および解析的研究によって明らかにするとともに、事例の観測結果に詳細な検討を加えて地下空間開発に必須の深い円形立坑設計法に係わる多くの有用な知見を得ており、地盤工学の発展に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。