

(論文内容の要旨)

効率的な社会資本整備や環境保全等の要請から、近接トンネルが計画される機会は少なくないが、トンネル相互間の影響により周辺地山の挙動が複雑になるため、設計や施工におけるトンネルの安定性評価が難しく、合理的な設計・施工法が確立されているとは言い難い状況にある。そこで、本研究では近接トンネルの事例として鷺羽山トンネル（二段双設）を取上げ、その掘削過程で得られた多くの計測結果について考察を加え、複雑な掘削過程を有する近接トンネルの周辺地山の挙動について明らかにした。また、近接トンネルの設計・施工において最も重要かつ支配的な要素である掘削にともなうゆるみとトンネル相互間の影響について分析し、ゆるみ領域やゆるみ領域の弾性係数の同定方法を新たに開発・提案した。また、本手法を用いた解析結果と計測結果の分析から得られた知見を取りまとめて近接トンネルの合理的な設計・施工法についての提言を行っている。

本論文は、序論および結論を含め、7章から成っている。

第1章は序論である。昨今の建設費用抑制の社会的要請や環境保全といった見地から近接トンネルが計画される機会は少なくないが、双設トンネルに代表される近接トンネルの合理的な設計・施工法は未だ確立されているとは言い難い状況であること、また、その主たる原因が掘削にともなうゆるみやトンネル間の相互干渉を定量的に評価し、設計や施工に具体的に反映できる方法が開発されていないためであることを示した。そして、本研究においては代表的な近接トンネルである鷺羽山トンネル（二段双設トンネル）を取上げ、当該工事で得られた各種計測データを分析・評価し、その知見をもってこれらの課題の解決方法を提案するという研究のアプローチの方法について述べている。

第2章では、近接トンネルにおける主要課題と本研究の位置付けについて述べている。

まず、近接トンネルを形態別に分類した後、近接トンネルに関する既往の研究について調査・分析した。その結果、これらの研究結果は多くの制約条件のもとでの結論であり、必ずしも実際の施工の状況を反映できていないこと、とくにトンネル周辺地山のゆるみやトンネル間の相互干渉の問題についてはほとんど言及されていないことを指摘した。次に、国内における代表的なトンネル設計指針では「近接トンネルの設計・施工」に関して、トンネル相互の影響について注意しなければならないことを指摘しているが、詳細は個別の対応にならざるを得ない状況を示した。さらに、近接トンネルの施工に関する既往の文献を調査し、近接トンネルの主要な課題が「トンネル掘削にともなう周辺地山のゆるみ制御とトンネル相互間の干渉の低減・抑止」であることを明らかにした。以上のことから本研究において最も重要な検討対象である「ゆるみ領域」について、①発生メカニズムにもとづく分類と定義、②測定法にもとづく分類と定義を行った。

第3章では、代表的な近接トンネルの例として鷺羽山トンネルを取上げ、トンネルの概要について述べている。二段双設という複雑な断面構成を有する近接トンネルを設計・施工するに到った検討経緯をまとめ、同種トンネルを計画・設計する場合の有効なアプローチの方法を示している。

次に、事前解析では①入力データの精度や信頼性に限界があること、②実際の地山に存在する不規則な亀裂の影響やトンネル相互間の干渉および周辺地山のゆるみの形成と影響を十分には取扱えないこと、からこれらを補完する手段として計画した現場計測の内容について詳しく述べた。

第4章では、鷺羽山トンネルにおける計測結果のうち地表面沈下と地中変位について詳しく分析している。まず、地表面沈下に関する考察では計測データの評価および弾性FEM解析の結果から比較的土被りの浅い双設トンネルに関して以下のことを明らかにした。

① 両トンネル直上の最終地表面沈下量はほぼ同等である

- ② 両トンネル直上の最終地表面沈下量はトンネル掘削の順序に依存しない
- ③ トンネル直上の地表面沈下量は単独トンネルの場合の 1.4~2.4 倍となる
- ④ 先行トンネル周辺のゆるみ領域の大きさおよびその物性劣化度合いが地表面沈下量の大小によって支配的要因である

次に、地中変位に関する考察から以下のことを明らかにした。

- ① 上下に配置されたトンネルでは下部トンネルから掘削するのが地山安定上好ましい
- ② 近接トンネルの離隔距離をトンネル掘削幅以上とすれば相互の影響はほとんど無い
- ③ 掘削による下方の地山への影響は D 級地山で 10m 以内、C_{II} 級地山では 5m 以内と考えてよい
- ④ 土被り比（土被り/掘削幅）が 1.0 以上あればトンネルの安定性評価をトンネル軸に直交する二次元平面解析で行ってよい

さらに、両トンネルが最も近接するメガネトンネル（離隔距離が 0）においても慎重に施工すれば、後続トンネルの掘削が先行トンネルの二次覆工コンクリートに与える影響は限定的かつ小さいことを示した。

第 5 章では、異なる 5 つの方法による計測によって実際にゆるみ領域を推定し、その結果間の整合性について分析するとともに、それぞれの推定方法の適用性について評価を行っている。5 つの推定方法のうち一つは逆解析と実測データを組合せたものであり、本研究において新しく提案された方法である。この方法を坑外地中変位測定結果に適用し、本方法がゆるみ領域の推定に有効なことを確認した。同時に 5 つの推定方法の特徴、問題点、適用限界について取りまとめ、これらを比較・検討した結果、ロックボルト軸力測定結果からの推定方法以外はゆるみ領域を推定する実際的な方法として有効であるとの判断を示した。さらに、トンネル掘削の影響が切羽前方の地山にも及ぶことを考慮すれば、掘削による全変位量を測定できる坑外地中変位測定結果を用いてゆるみ領域を推定する方法が最も信頼性の高いことを実測結果から指摘した。

第 6 章では、ゆるみ領域の物性値のうち数値解析において最も重要な要素となる弾性係数に着目し、弾性係数の推定に最も合目的な坑内弾性波探査結果を用いて実際に弾性係数を推定している。その結果、ゆるみ領域の弾性係数は非ゆるみ領域の 0.12~0.38 倍であることを見出した。

次に、逆解析を用いたゆるみ領域の弾性係数の推定方法を新たに考案するとともに、実際の計測データに本方法を適用し、ゆるみ領域の弾性係数は非ゆるみ領域の 0.1~0.2 倍であることを見出した。

この結果（ゆるみ領域の弾性係数を非ゆるみ領域の 1/10 とする）を用いてゆるみを考慮した弾性 FEM 解析を実施し、双設トンネルにおける後続トンネルが先行トンネルに与える影響について考察した。この結果、土被りの比較的浅い双設トンネルの設計・施工法に関して以下の提案を行った。

- ① 事前解析ではゆるみを考慮した解析を行うことが有効であり、ゆるみ領域の弾性係数として非ゆるみ領域の 1/10 の値をとれば不経済にならない範囲で最も安全な設計とすることができる
- ② 先行トンネルの掘削においてゆるみの発生を抑制することにより、後続トンネルの掘削が先行トンネル二次覆工コンクリートに与える影響（例えば引張り応力の発生）を低減できる
- ③ 先行トンネル二次覆工コンクリートの天端部内側と後続トンネル側肩部外側は鉄筋で補強しておくのがよい
- ④ 先行トンネルのゆるみ領域を 2.0m 程度以内に抑制し、両トンネルの接合部を慎重に施工すれば後続トンネルは単独トンネルとして設計・施工してもよい

最後に、後続トンネル掘削時の先行トンネルにおける二次覆工コンクリート応力（鉄筋応力）の実測値と上記の解析結果を比較・検討し、本研究で提案した手法の有効性を確認した。

第 7 章では、結論として本研究により得られた結果を取りまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

近接トンネルの設計・施工については従来から単設トンネルとは異なる特有の問題が指摘されてきた。具体的にはトンネル相互間の影響をどのように評価し、設計・施工に反映させるかが中心的課題となっており、とくに掘削にともなう周辺地山の挙動解明やゆるみの合理的な取扱い方法の研究・開発が強く望まれてきた。このような背景から、非常に複雑・多岐にわたる施工と計測を行った鷺羽山トンネルの例を取り、その計測結果について考察を加え、近接トンネルの掘削にともなう周辺地山の挙動特性を明らかにした。また、逆解析と計測結果を組み合わせた新しいゆるみ領域の推定方法およびゆるみ領域の弾性係数の同定方法を提案した。さらにこれらの方法を適用してゆるみを評価し、その結果を考慮した解析を実施するとともに、得られた知見を取りまとめて比較的土被りの浅い双設トンネルの設計・施工法に関する提言を行ったものである。

本論文の主な内容は以下のとおりである。

- 1) 二段双設トンネルである鷺羽山トンネルにおける計測結果を分析し、複雑な掘削過程を有する近接トンネルにおける周辺地山の挙動(変位, ひずみ, ゆるみ)について高精度, 広範囲かつ三次元的に明らかにした。この結果, トンネル掘削が下方および側方の地山に及ぼす影響範囲を明らかにし, 上下に配置された近接トンネルでは下方のトンネルから掘削するのが地山安定上有利であること, 双設トンネルにおいて離隔距離が掘削幅以上あれば単設トンネルとして設計してよいことを見出した。
- 2) 計測結果の分析から双設トンネルにおける地表面沈下量に関してトンネル間の相互干渉を定量的に明らかにした。また, 先行トンネル掘削による応力再配分, ゆるみ領域の大きさ, ゆるみ領域の弾性係数の低下が双設トンネルの地表面沈下量に及ぼす影響を解析的に明らかにした。
- 3) 計測結果の分析から, 双設トンネルにおいて慎重な施工を行えばトンネル間の相互干渉によって先行トンネル周辺のゆるみ領域が拡大する可能性は小さく, 先行トンネルの二次覆工コンクリートに与える影響は大きくないことを明らかにした。
- 4) 異なる4種類の計測方法(ロックボルト軸力測定, 坑内地中変位測定, 坑外地中変位測定, 坑内弾性波探査)による結果からゆるみ領域を推定するとともに, 逆解析と計測データを組み合わせるゆるみ領域を推定する新しい方法を提案し, 実際に現場に適用した。これらの推定結果を比較・検討し, ゆるみの推定方法を評価した結果, ロックボルト軸力測定以外の方法はゆるみ領域の推定方法として実際上有効であることを明らかにした。
- 5) ゆるみを考慮した逆解析の定式化を行い, これを用いてゆるみ領域の弾性係数を同定する手法を提案した。実際の計測データに本手法を適用し, その有効性と適用限界を確認している。また, 4)で提案した新しい方法によりゆるみ領域を推定した後, ここで示した方法によりゆるみ領域の弾性係数を同定し, これらの結果を用いて双設トンネルの掘削解析を実施した。この結果をもとに, 比較的土被りの浅い双設トンネルの設計・施工に関する提言を行っている。なお, 実測データからこれらの手法の有効性と本提言の妥当性を確認した。

以上, 要約すると, 本論文は, 実際の近接トンネルにおける多くの計測データをもとにトンネル掘削にともなう周辺地山の挙動を明らかにするとともに, 新しいゆるみの評価手法を提案し, 本手法を適用した解析結果から双設トンネルの設計・施工に関する新たな提言を行ったものであって, トンネル工学の分野の発展に関し, 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, 平成20年11月12日, 論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果, 合格と認めた。