

(13) AGF工法の簡易設計法に関する研究

STUDY ON A SIMPLIFIED AGF DESIGN TECHNIQUE

御手洗 良夫* ・ 西間木 朗*

Yoshio MITARASHI, Akira NISHIMAKI

The AGF method is widely used as a powerful auxiliary tunneling technology for NATM in Japan in these years. Its effectiveness is well known in the field, but its mechanism has not yet been known exactly. Therefore no comprehensive design technique has been established yet. This paper evaluates the effects of the AGF method according to field measurements, then verifies that two-dimensional finite-element analysis and beam-on-elastic-floor analysis allow us to determine a behavior similar to the results of three-dimensional finite element approach. On the basis of such study, the present paper proposes a simplified design technique considering complicated three-dimensional ground behavior encountered in tunnel excavation.

1. まえがき

AGF工法は、日本で開発・改良されたトンネルの補助工法で、最近3、4年多くのトンネル現場で適用され、施工実績は1995年10月現在で80件を越えている。現場での効果は衆知されているが、その効果のメカニズムは解明されておらず、したがって、統一的な設計手法は確立されていないのが現状である。本報文は、AGF工法の簡易設計法の提案を行った。まず、AGF工法の効果を、トンネルの計測結果に基づいて評価し、2次元FEMおよび弾性床上の梁の解析によって、3次元FEMの結果と近似の挙動を把握できることを確かめ、トンネル掘削時の複雑な3次元挙動を考慮した簡易設計法の提案を行った。

2. AGF工法の効果

2.1 計測結果によるAGF工法の効果の確認

同一条件で、AGF工法がある場合とない場合の実際の挙動を比較することは不可能であるが、両者の挙動の違いを評価する一つの試みとして、ほぼ同じ条件と思われる過去のトンネル現場の計測値を調べた。

AGF工法が実施された現場とAGF工法が施工されていなかった現場の計測変位量と比較したのが図-1である。AGF工法を実施した場合は最終変位量が多くても30mm程度までに抑えられており、AGF工法

* 正会員 (株)熊谷組土木技術部トンネルグループ

を実施しなかった場合の変位量と比較すると、AGF工法の変位抑制効果が優れていることがわかる。

2.2 FEMを用いたAGF工法の効果の検証

AGF工法の効果を数値解析によって検証した。FEMの3次元逆解析を行い、その結果得られた地山の弾性係数を用いてAGF工法が実施されていない場合の順解析の結果と比較した。

解析に使用したモデルを図-2に示す。解析に使用した物性値は、吹付けコンクリート $20,000\text{kgf/cm}^2$ 、AGF鋼管 $2,100,000\text{kgf/cm}^2$ とした。逆解析に使用した入力計測値は、AGF施工現場から得られた平均的な値を用い、天端沈下 22mm 、水平変位 13mm とした。AGF工法のモデル化は、AGF鋼管を梁要素で表現することによってのみ表現した。注入の効果は、自立性の悪い地山構成要素を結びつける作用を解析に用いた連続体モデルが表現していると判断し、特別なモデル化は行わなかった。

逆解析の結果、地山の弾性係数は 350kgf/cm^2 になった。順解析（梁要素が無い場合の解析）の結果と比較すると、AGF工法が施工された場合には安全率の高い領域が広がっていることがわかった。また、図-3に示すように、AGF鋼管のモデルである梁要素のモーメントの分布も実測値と近似している。

したがって、AGF工法を採用した場合のトンネル掘削時の挙動が、3次元FEM解析で十分再現可能であり、3次元FEMがAGF工法の設計方法を確立するための有効な方法の一つであることが確かめられた。

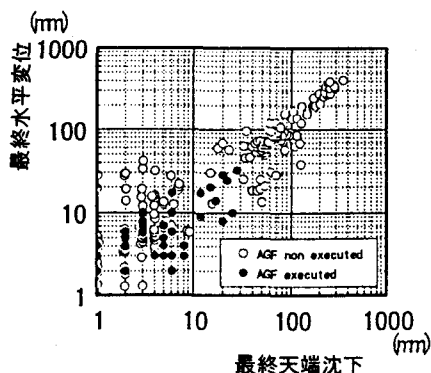


図-1 AGF工法の変位抑制効果

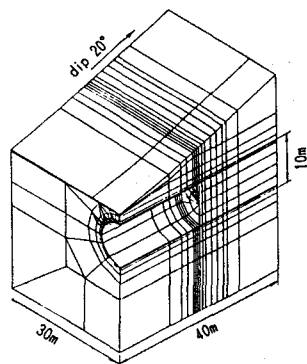


図-2 逆解析FEMモデル

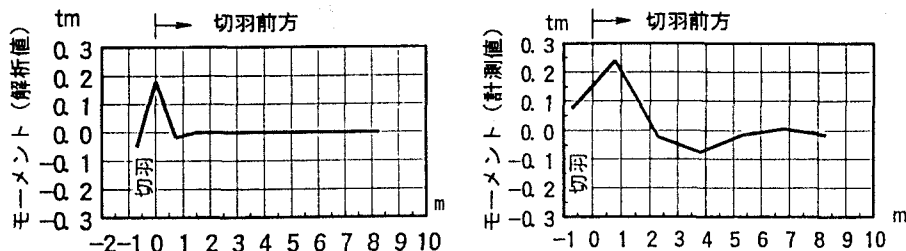


図-3 解析値と計測値のモーメント分布の比較

3. AGF工法の簡易設計法の提案

3次元FEMは、AGF工法を用いたときの地山の挙動を表現するのに効果的な手法である。しかし、3次元FEMは、その処理に時間と手間を要するため簡易な方法で同等の結果を得る手法が必要となった。そ

こで、2次元FEMと弾性床上の梁の解析によって地山とAGF鋼管の安定性の検証を行った。その結果を整理することにより、簡易に設計できる早見表を考案した。

3.1 3次元FEMを用いたAGF工法施工時のトンネル挙動

AGF工法の設計法を考案するにあたり、AGF工法施工時のトンネル挙動を3次元FEMを用いて把握した。AGF工法が、一般に、土被りの浅い箇所に適用されているため解析モデルは、土被りを2D(Dはトンネル幅)とした。解析モデルを図-4に示す。地山の物性値は均一としたが、地山物性値がAGF工法の設計に及ぼす影響を調べるために、数種の地山物性値について解析を行った。AGF工法のモデル化は逆解析時と同様である。また、地山が最も不安定になる時を対象とするためトンネル掘削後、吹付コンクリート施工前の状況を想定して解析を行った。

AGF鋼管のモーメントおよび軸力を図-5に示す。地山の安全率の分布を図-6に示す。安全率から見たトンネル掘削の影響範囲は、AGF工法により25%減少できることがわかる。また、トンネル切羽周囲の平均安全率は、平均1.5~2.5上がっておりAGF工法の有効性が示されている。

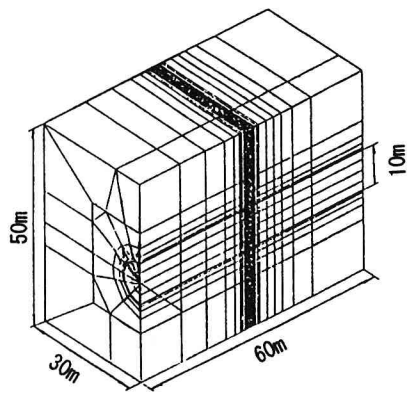


図-4 FEM解析モデル

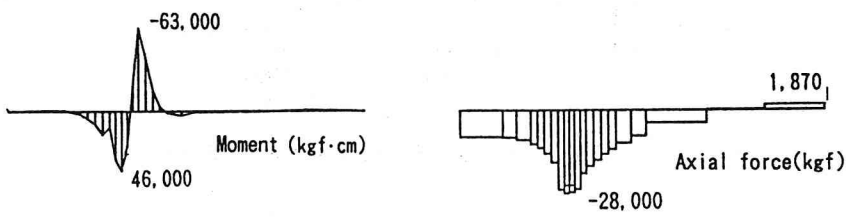


図-5 AGF鋼管のモーメントと軸力（解析値）

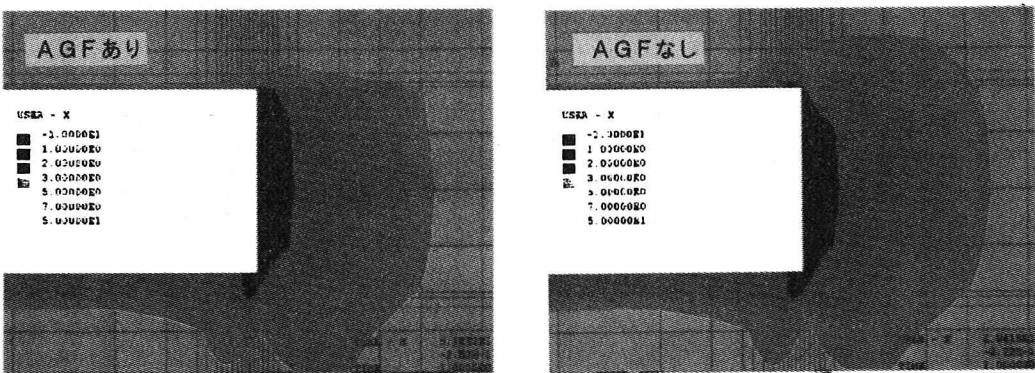


図-6 安全率の分布

3.2 3次元から2次元へのモデル化

簡易な設計法を考案するために3次元から2次元へのモデル化を試みた。AGF工法の設計で確かめる必要があるのは、①トンネル掘削時に地山が安定に保たれていること、②トンネル掘削時にAGF鋼管が安定に保たれていること、である。3次元から2次元へのモデル化は、①地山の安定に関しては2次元平面歪FEM解析を、②AGF鋼管の安定に関しては弾性床上の梁の解析を行うことにした。

3.2.1 2次元FEM解析による地山の安定性検証方法

地山物性値は3次元FEMで用いた値と同様とし、注入によって改良される領域の物性値を変化させてモデル化し、3次元FEMで得られた変位と等しくなる物性値を求めた。その結果得られた地山の弾性係数と注入による改良率の関係を図-7に示す。地山の安定性は3次元FEMで得られた結果とほぼ同じ結果を示した。したがって、AGF工法を行った場合の効果は改良域の物性値を図-7に示した値に上げることでより表現することができる。この方法により、地山の安定性は、3次元FEMの解析を行わなくても、2次元FEMにより評価することができる。

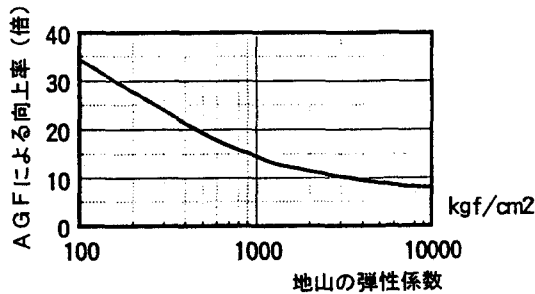


図-7 AGF工法による地山弾性係数の向上率(2次元FEM)

3.2.2 弾性床上の梁の解析によるAGF鋼管の安定性検証方法

モデルを図-8に示す。荷重は、3次元解析結果からトンネル掘削の影響範囲が現れている区間で均等分布とした。地盤反力係数は、吹付けコンクリートおよび地山の区間でそれぞれ一定とした。図-8の P_{max} 、 K_1 、 K_2 の値を変化させて図-5に示したモーメントに最も近似する値を求めた。図-9に P_{max} 、 K_1 、 K_2 と地山の弾性係数の関係を示す。図-9に示した値を用いて弾性床上の梁の解析を行うことにより、3次元FEMの解析を行わなくても、AGF鋼管の安定性を評価することができる。また、AGF鋼管の設計にあたっては、計測結果および数値解析結果が示すように、軸力の存在も無視することができないため、モーメントから求められた曲げ応力に対し圧縮応力の増分を考慮する必要がある。

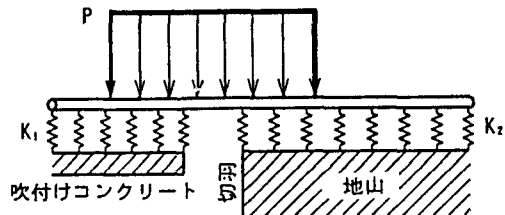


図-8 弾性床上梁モデル

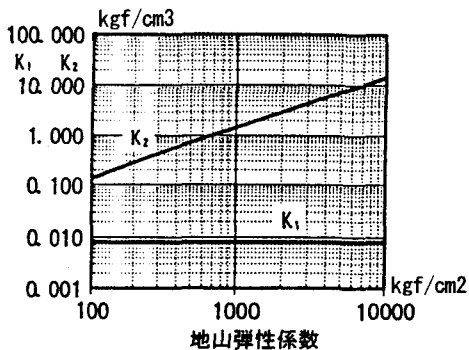
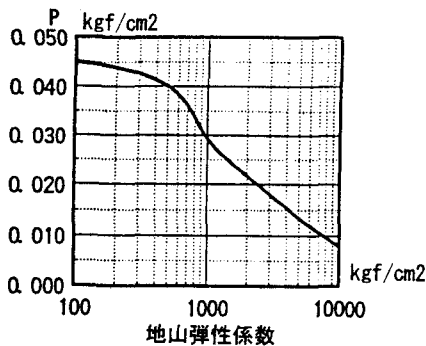


図-9 地山弾性係数と荷重および地盤反力係数の関係

3.3 AGF鋼管ピッチ決定のための簡易早見表

3次元FEM解析結果をAGF鋼管ピッチ毎にまとめたのが、図-10である。地山の弾性係数と土被りが決まれば図-10によりAGF鋼管の応力が許容値を越えない最大ピッチが決定される。施工性から、AGF鋼管の打設ピッチは30～60cmの範囲に限定され、実際の施工に見合った施工ピッチを選定する。

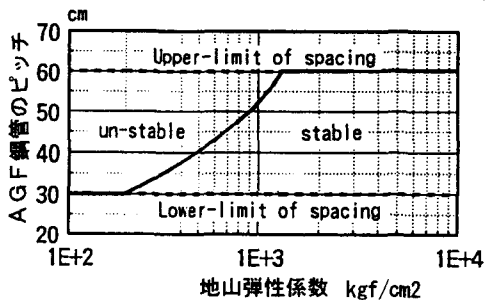


図-10 地山弾性係数とAGF鋼管ピッチの関係

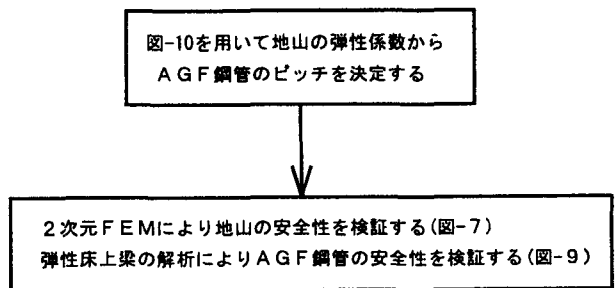


図-11 AGF工法簡易設計手順

3.4 AGF工法の簡易設計法

図-11にAGF工法の簡易設計法フローを示す。AGF工法の簡易設計法の手順は、まず、図-10を用いて地山の弾性係数に対するAGF鋼管のピッチを暫定的に決定する。次に、図-7を用いた2次元FEM解析によって地山の安定性検討と、図-9を用いた弾性床土梁の解析によってAGF鋼管の安定性検討を行い最終的なAGF鋼管ピッチを決定する。このようにして、簡易にAGF工法の設計ができる。

4. 結論

AGF工法の効果を計測結果、数値解析結果を用いて示した。さらに、地山の弾性係数さえ決まれば即座に、AGF鋼管の打設仕様を決定することができ、2次元FEMにより地山の安定性を弾性床土梁の解析によりAGF鋼管の安定性を評価できることを示し、AGF工法の簡易設計方法を提案した。

今後は、自立性の特に悪い地山の挙動の把握のために、不連続性の考え方を取り入れた設計法に取り組み、より効率の良い設計法を考案していきたい。