

併設トンネルにおけるピラー部補強の設計と施工

The design and construction of pillar reinforcement at horizontal twin tunnels.

栗山廣志¹⁾・古賀徳治²⁾・緒方隆哉³⁾・中村秀光⁴⁾・上林武司⁵⁾

Hiroshi KURIYAMA, Tokuji KOGA, Takaya OGATA, Hidemitsu NAKAMURA, Takeshi KAMBAYASHI

NATM is used for excavation of department tunnel between stations in construction of subway line No. 3 by Fukuoka-city traffic bureau.

There is a section of cross change from large tunnel to small twin tunnel. That section (at twin tunnel side) there are not many intervals in each tunnel. And grounds are easy to destroy caused by the impact of KEGO fracture.

It is weighty the grasping behaviors of ground. Especially NATM in urban site adapt the observation construction reasons of safety.

Key words: urban NATM, twin tunnel, pillar, observation construction

1. はじめに

福岡市地下鉄3号線は、都心部の天神から郊外に向けて、放射状にのびる建設延長12.7kmの新設路線である。

本路線の駅間部施工法は、地質及び立地条件等を勘案して、開削工法4.2km、シールド工法2.9km、及びNATM2.8kmで計画し、他の地下鉄に比べNATMを多く採用しているところが特徴的である。

NATMは、駅部から発進するシールドに比べ、駅開削工事と同時施工することにより、全体工程が短縮可能なほか、経済性が見込めること等が主たる採用の理由である。また、本市が1号線延伸工事においてNATMを採用しており、この経験を設計に反映した結果でもある。

都市NATMでは、周辺重要構造物との近接施工など施工条件が厳しく、トンネル掘削に伴う地山挙動の把握が、施工の経済性ととともに施工の安全性を左右するといえる。また、補助工法を併用することも多く、これらの適正を判断するため、解析と計測を用いた情報化施工が重要となる。

しかし掘削断面の変化や構造物との近接施工など特殊条件下では、事前解析による施工予測や現場計測だけでは、地山挙動の把握が困難であり、フィードバック解析を含む数値解析の活用が有効といえる。

今回報告を行う薬院西工区建設工事においても、駅間部トンネルにNATMを用いているが、掘削断面の変化も多く、トンネル周辺に近接構造物も多く位置するため、地山挙動の把握は不可欠であり、情報化施工を併用し安全性の確保と経済性の両立を図っている。特に単線併設トンネル区間ではピラー部補強の設計施工に、情報化施工を活用したため、その状況について報告する。

1)正会員 中央復建コンサルタンツ(株) 総合2部

2)福岡市交通局 建設部 第一工事事務所 所長

3)福岡市交通局 建設部 建設設計課 課長

4)正会員 福岡市交通局 建設設計課 係長

5)西松・松村・梅林建設共同企業体 副所長

3.1 地表面沈下抑制方法の選定

トンネル掘削断面等の施工条件がこれまでと異なるため、これまでに得られた計測結果から地山挙動の把握をおこなうほか、数値解析により各補助工法を用いた場合の周辺構造物への影響を予測し、施工方法を選定した。

比較検討にあたっては本工事で施工実績のある、①注入式長尺鋼管先フォアパイリング、②注入式フォアポーリング、③薬液注入とした。

(1) これまでの計測結果と地山挙動

対象区間に至るまでの計測結果からは、以下のことが判明した。

- ① 地表面とトンネル天端の沈下量が等しい「共下がり」が確認された。
- ② 先行変位は全変位量の 40%程度であった。
- ③ 地表面の沈下はトンネル直上で大きい値になっているが、影響範囲としては狭く、トンネル掘削幅との相関が認められた。
- ④ 地表面沈下量はトンネル掘削断面に比例する。
- ⑤ 補助工法の変位抑制効果は表.1 に示す通りであった。

これらのことから、単線併設区間の予想される地山挙動としては、以下のことが予想された。

- ① トンネル掘削断面の縮小により、地表面沈下量は小さくなる。
- ② トンネル掘削幅の拡大により地表面沈下範囲が拡がり、官民境界での沈下量増大と周辺構造物への影響が発生する。

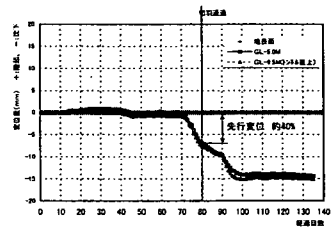


図-4 沈下特性曲線にみる共下がり

表-1 変位抑制効果

補助工法名	収束変位抑制率
AGF	50%
PU-IF	30%
増ロックボルト	20%
薬液注入	20%

(2) 数値解析による施工予測

数値解析（二次元弾性有限要素法解析）では、先受け効果は評価が困難であるため、通常掘削時のケースを解析し、これにこれまでの計測実績に基づく表-1 の変位抑制率をかけることで、変位予測をおこなった。

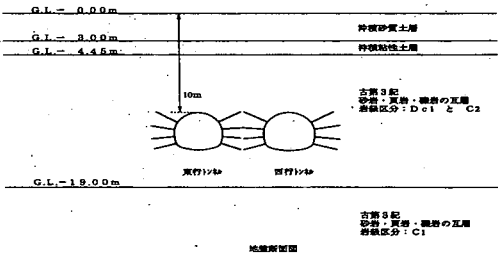


図-5 解析断面

補助工法使用時の変形量 (δ_2)
= 通常掘削時の変形量 (δ_0) $\times$ 補助工法の変位抑制率 (α)

解析の結果からはトンネルセンターでの地表面沈下量は管理基準値 (30mm) を下回るが、官民境界での沈下量は大きく発生すると予想された。このため、変位抑制効果の最も高い注入式長尺鋼管先フォアパイリング (AGF) を採用することにした。

表-2 二次元解析結果 (地表面沈下)

補助工法名	トンネルセンター(最大)	官民境界
無し	29.32mm	15.77mm
PU-IF	20.52mm	11.04mm
AGF	14.66mm	7.89mm

3.2 ピラー部補強方法の選定

ピラー部補強については、左右トンネルの掘削前に施工する必要があるため、ピラー部地山の改良、先受けによる地山の保護が適当と考えられた。

地表面沈下の抑制に注入式長尺鋼管フォアパイリング（AGF）を用いることから、ピラー部の地山の保護を目的に AGF 鋼管の水平打設をおこない、パイプルー的な活用方法を考案し、試験的に採用することにした。また、ピラー部のゆるみによる崩壊を防ぐため、後行トンネル掘削時にピラーを緊結するタイバーを設置することにした。

これらの施工方法は前例も無いため、計測により設計の妥当性検証をおこなうこととした。

設計変更支保パターンを図-8 に示す

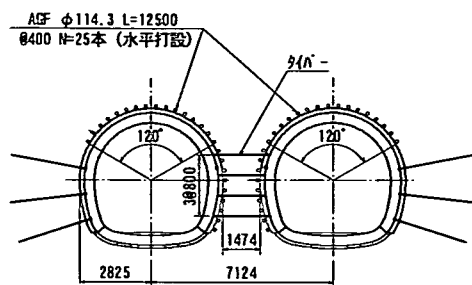


図-6 設計変更支保パターン

4. 実施工と計測結果

(1) 実施工と予想される地山挙動

検証を行う上で、予想される地山挙動としては、以下の状況があげられる。

- ①ピラー部は常に掘削側へ引っ張られるため、左右交番の変形（以下交番変形）を受ける。
- ②トンネル周辺の変形は後行トンネルで最大となる。
- ③地表面沈下の影響範囲は大きくなる。

(2) 計測結果

地表面での掘削影響範囲は、当初予想されたとおり、大断面を一本掘る場合に比べ広がった。しかし、周辺重要構造物への影響は発生せず、無事施工を完了した。

掘削地山は後行トンネル側（海側）で湧水も多く、脆弱であったため、後行トンネル直上での沈下が、先行トンネルの約 1.5 倍と大幅に大きい値になった。

ピラー部の挙動を計測するために設置した地中変位計は（パイプ歪み計を改良したもの）、先行（山側）掘削時においても地山が脆弱であった海側トンネル方向の変形が大きく、予想された左右交番変形は確認できなかった。

またタイバーへの軸力は、ピラー剛性の補強により変形が抑制されたため、打設時に与えたプレストレスからほとんど変化がなかった。

計測結果の多くが地山の影響を大きく受けている中で、先行トンネルのインバート吹付コンクリートに応力増加が確認され、近接施工時におけるインバート補強の効果が高いことがわかった。

これらの計測結果では、併設トンネルの地山挙動とピラー一部の剛性が補強されたことについて確認出来ただけであり、ピラー部補強の妥当性については不明な点が多く、評価困難であった。

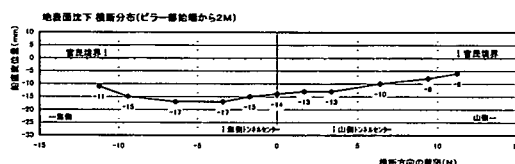


図-7 地表面沈下横断分布

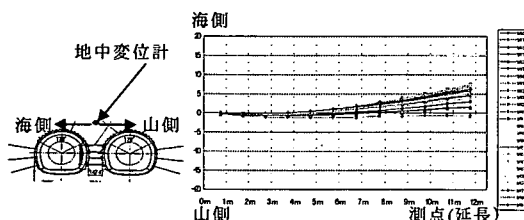


図-8 地中変位計計測結果

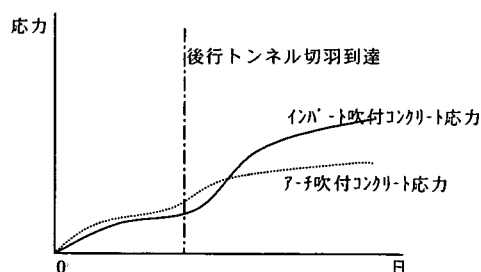


図-9 インバート吹付コンクリート計測

5. 三次元解析による検証

計測結果によるピラー部補強の評価は困難であったため、解析によるシミュレーションを行うことにした。

今回用いた注入式長尺鋼管フォアパイリングについては先受けの効果が大きいほか、後行トンネル掘削時の先行トンネルへの影響に着目する必要がある、トンネル奥行き方向の三次元的挙動を把握することが重要であるため、三次元解析を適用することとした。

5.1 三次元解析方法

解析モデルを図-13に示す。

解析ケースとしては、補助工法（注入式長尺鋼管フォアパイリング）を併用した場合と用いなかった場合の2種類とした。また、注入式長尺鋼管フォアパイリングはトンネルを包み込むシェル要素として考慮した。

5.2 三次元解析結果

解析結果から求まる変形状況では、先行トンネルにおいて最大地表面沈下量が確認されたが、これはピラー部の挙動に着目した解析であったため、先行トンネルの掘削（延長11m）を一括しておこなったことが原因と考えられる。

補助工法の有無による変位の違いを表-4に示す。

沈下に着目した場合、補助工法を用いた場合の変位抑制効果は、トンネル天端で50%程度と、実施工の計測結果に近い状況を再現している。

これまでに行ってきた二次元解析では、補助工法の効果、特に先受けに関しては評価が困難であったが、三次元解析では実挙動に近い解析が可能と考えられる。

ピラー部の評価については、補助工法（注入式長尺鋼管フォアパイリング）の有無による影響として以下のことが判明した。

- ① ピラー部の左右交番変形は補助工法の有無に関わらず発生するが、補助工法を用いた場合、変位は0.5mm程度と微小になり、計測では捉え難い状況である。
- ② 補助工法を用いない場合、ピラー部に安全率の低い個所が大きく発生するが、補助工法を用いた場合、安全率の低い個所が小さく抑えられる。
- ③ 補助工法として用いられた注入式長尺鋼管フォアパイリングによる剛性は高く、タイバーには荷重はほとんど発生しない（計測結果の妥当性を確認できた）。

以上のことから、ピラー部の補強についてはその効果

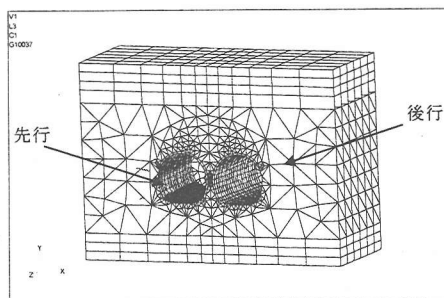


図-10 三次元解析モデル図

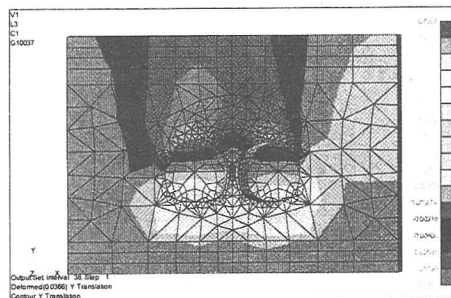
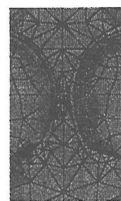


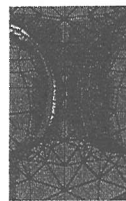
図-11 沈下状況

表-4 変位一覧

補助工法	位置	トンネル天端沈下	地表面沈下
無し	先行	17.5mm	9.6mm
	後行	15.3mm	8.1mm
AGF	先行	8.9mm	5.8mm
	後行	7.8mm	4.6mm



ピラー補強無し
(トンネル周辺の
改良が確認出来ない)



ピラー補強有り
(トンネル周辺で剛性
補強がされている)

色の濃い部分が安全率の高い個所

図-12 ピラー部の安全率

が確認できたと考えられる。しかし、計測で確認されたインバート吹付コンクリートの効果は、岩盤（地山）との付着によって得られるものであり、地山に追従して変形するため剛性が小さく評価され、有限要素解析ではその効果の評価が難しい。また、共下がりの評価についても評価困難であり、これらの点を克服することが今後の課題と考えられる。

6. 考察

今回の検討により、注入式長尺鋼管を用いたピラー部補強は、三次元解析により剛性の向上が確認され、補強方法としては概ね妥当と考えられた。地山状況に応じ、鋼管の打設間隔を調整することで、剛性補強を調整することが可能であり、経済性の追求も可能と考えられる。

タイバーの緊結によるピラー部の拘束は、注入式長尺鋼管による変形抑制効果が卓越したため、明確な効果が確認出来なかった。しかし、ゆりみ発生時にはピラー部の変形抑制が期待できるため、補助的な役割として使用するべきと考えられる。

本工事では反対方で同様の中央導坑先進単線併設トンネルが設計されており、今回の一連の検討結果を設計・施工に反映し、経済性と安全性の向上に努めたいと考えている。

7. おわりに

今回の検討では、計測内容とその結果が評価困難な状況にあり、グレードの高い解析を用いて地山挙動を正確に把握することで、設計・施工の妥当性をうまく検証できたと考えられる。特に三次元解析は、実施工での地山挙動を比較的うまく表現できその有用性が確認された。

三次元解析はトンネル縦断方向での地山挙動を再現可能であるため、複雑な条件下での施工予測には適し、先受け効果の高い補助工法もうまく考慮できたといえる。

しかし現状の三次元解析においては、経済性や評価手法に課題があり、今後適用例を増やすことで、これらの改善を図ることが可能と考えられる。

これに対し二次元解析は、パソコン環境の進歩により現場での適用が簡便なほか、これまでの実績も多く評価が容易である。このため、通常のNATM施工における情報化施工では、二次元解析により十分な検討が可能である。また、二次元解析ではフィードバック解析による地山物性の見直しも容易であり、情報化施工への適用性が高いといえる。

NATM施工では解析の重要性が高いといえるが、施工条件によって解析方法を設定することが肝要と考えられる。

今後は情報化施工の精度を高める計測・解析方法の研究をすすめるほか、得られた情報を次施工や将来の設計などに有効活用したいと考えている。

参考文献

- 1) 緒方隆哉ほか：扁平断面の地下鉄をNATMで掘る、トンネルと地下 第30巻10号