

都市NATMの情報化施工と設計・施工へのフィードバック

Observational Construction of Urban NATM and Application to the Design and Construction

上林 武司* 矢根 健二**
Takeshi Kambayashi Kenji Yane
大和谷 実***
Minoru Yamatoya

要 約

当工事は、市街地道路直下の土被りの薄い（平均約10m）都市NATMによる地下鉄道トンネル工事である。通常の計測A、Bに加えて、所要所に自動計測Cを配置し、リアルタイムに監視することで周辺環境に与える影響とトンネル自体の安全性の確認を行うものである。この計測情報を当地盤特性に照らし合わせて整理・分析・評価し、支保パターンの妥当性の検証と補助工法の有効性の有無を定量評価した。また、より合理的、かつ経済的なトンネルを構築する見地から、計測情報に基づく予測解析を実施し、設計の修正や以後の施工法（補助工法）へのフィードバックを行った。

当工事により、都市NATMにおける情報化施工のひとつのモデルを確立できたと考えるので、ここに報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要・地質概要
- § 3. 計測計画
- § 4. 計測実績と補助工法の効果の確認
- § 5. 評価、考察
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

福岡市西南地域には鉄道がなく、通勤・通学などはバスや自動車に頼らざるを得ない状況である。このため、道路が各所で混雑し、特に都心方向は交通渋滞が慢性化している。福岡市高速鉄道3号線は、この福岡市西南地域の慢性的な交通渋滞を緩和し、効率的で利便性の高い公共交通体系の確立を図る目的で建設される地下鉄工事である。橋本駅を起点とし、天神駅を終点とする延長約12.7kmを新設するものである。

当工事は、この内、桜坂～薬院西駅間1,003.9mを施工し、一般部838.9mを山岳トンネル工法（NATM）で、また、駅部165mを開削工法で構築するものである。

§ 2. 工事概要・地質概要

2-1 工事概要

工 事 名：福岡市高速鉄道3号線薬院西工区建設工事

発 注 者：福岡市交通局

工事場所：自）福岡市中央区桜坂3丁目5番地先
至）福岡市中央区薬院4丁目1番地先

工事期間：自）平成8年12月12日
至）平成12年12月20日（1,470日）

施 工 者：西松・松村・梅林建設工事共同企業体
比率50％・25％・25％

設 計 者：中央復建コンサルタンツ(株)

工事数量：薬院西工区 延長 1,003.9m

一般部 山岳トンネル工法（NATM）延長838.9m

複線 578.9m×54.2m² 複線特Ⅰ 44.0m×91.5m²

複線特Ⅱ 91.0m×74.6m² 単列並列 125.0m×25.6m²×2本

立坑 φ14m×16.5m 土留方式はSMW

横坑 33.6m²×12m, 連絡坑 23.1m²×34m

駅部 開削工法 延長165m

堀削深さ 約15m 堀削幅約 約16m

2-2 工法等の概要

堀削工法：上半先進ベンチカット工法（ショートベンチ）

堀削方法：機械堀削（上半）ロードヘッダ（S200）

（下半・インバート）ブレイカー

ずり出し方式：レール方式

堀削順序：片押し施工（立坑～桜坂側、立坑～薬院西側）

* 九州（支）福岡地下鉄（出）副所長

** 九州（支）福岡地下鉄（出）工事主任

*** 九州（支）福岡地下鉄（出）所長

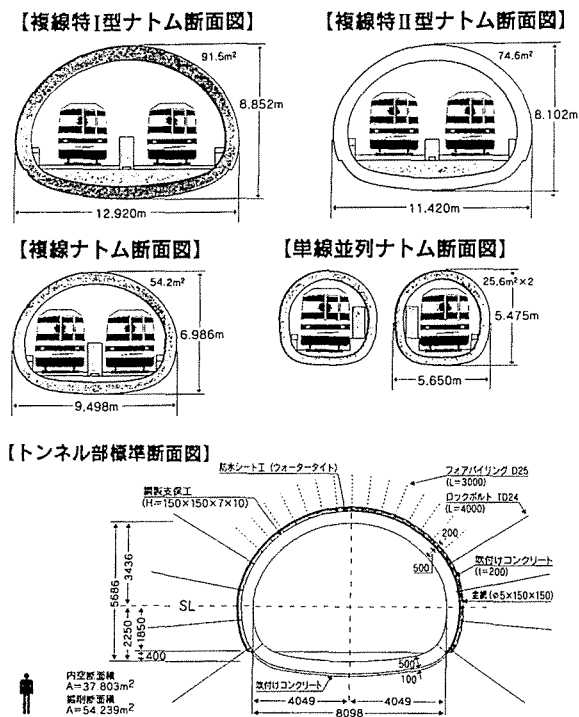


図-1 トンネル断面図

補助工法：薬液注入工法，地質確認・水抜きボーリング
PU-IF工法，AGF・AGP工法

2-3 工事の特色

- ①土被りが8～12mと非常に小さい典型的な都市NATMである。このため，掘削による地表面変位や周辺構造物への変状が予想される。また，歩道直下のガス，水道等の地下埋設物への影響も懸念される。
- ②警固断層（活断層）の影響範囲である破碎帯区間（NATM終端側の約400m間）は，地山補強や止水効果を目的とした大規模な補助工法（AGF・AGP工法，薬液注入工法，PU-IF工法）を採用している。
- ③掘削断面は大きく分けると4種類である（複線，複線特I，複線特II，単線並列）。このため，施工方法や施工順序が複雑かつ変化に富んでいる。

- ④トンネル周辺には100ヶ所以上の井戸が存在し，トンネル掘削による地下水位の低下や井戸枯渇等の問題が懸念される。

2-4 地質概要

福岡市域を構成する地質は，大きく分類すれば，白亜紀風化花崗岩，古第三紀層砂岩および頁岩が基盤岩となり，表層部に沖積層，洪積層が堆積している。この内，当区間は主に古第三紀層を掘削するものである。桜坂駅終端から約400mは丘陵地を呈し，地表面まで基盤岩が覆っている。一方，薬院西駅側は基盤岩が深くなり，上層に沖積層の粘土層，砂質土が厚く堆積し最も厚い部分で約7mとなる。

掘削の対象となる古第三紀層は，砂岩および頁岩を主体とする。その特性は沖積層と接する上層面約2mは風化が進み粘土化し，N値50以下と脆弱であり，沖積層地下水と岩盤内地下水を遮断する不透水層となっている。深度が増すにつれ岩盤強度は増す傾向にあるが，トンネル深度付近では亀裂が多く一軸圧縮強度で9.8N/mm²前後である。

§ 3. 計測計画

計測管理基準については，①過去の施工実績 ②地山の限界ひずみ ③FEM解析結果の3つを比較検討の上，安全性を考慮してこれらの内の最小値を管理基準値とした。各計測項目別の管理基準値を図-2に示す（ここでは計測Aのみ）。なお，計測Cとは地表面より地中に計測器を設置し，トンネル掘削時の先行変位，地中変位を捉えるもので，自動計測にて行う。

§ 4. 計測実績と補助工法の効果の確認

1999年10月末現在，トンネル延長L=838.9mの内，751.9mの掘削が完了している。この内，収束しているのは，667.9m（複線標準型L=578.9m，複線特II型74m，

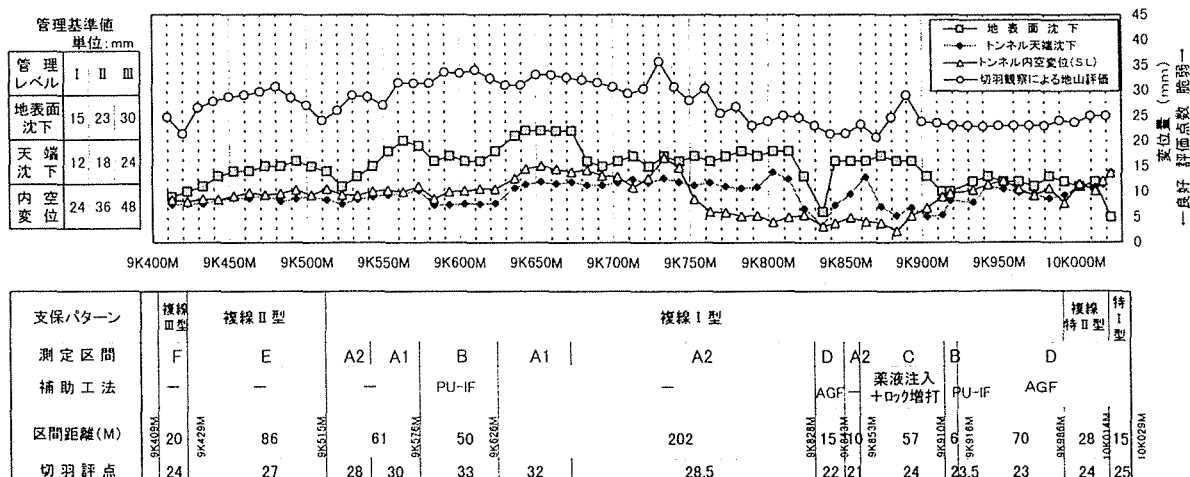


図-2 地山分類と計測結果

複線特Ⅰ型15m)であり、この区間の計測実績を図-2に示す。主要な計測項目は、地表面沈下、天端沈下、内空変位の3項目である。

次に、地表面沈下における先行変位の比率(先行変位、最終変位)を図-3、トンネル掘削に伴う地中鉛直変位の経時変化図を図-4、天端沈下と内空変位の関係を図-5に示す。

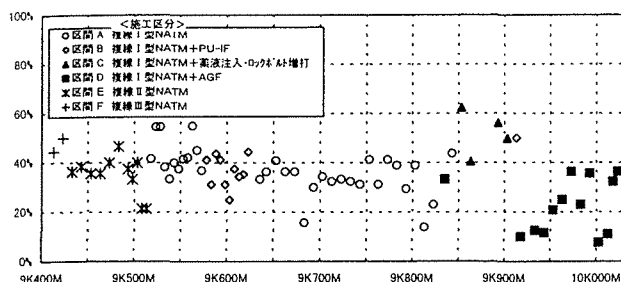


図-3 先行変位の比率(先行変位/最終変位)

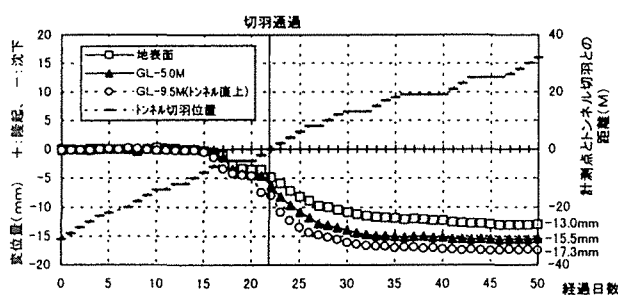


図-4 トンネル掘削にともなう地中鉛直変位

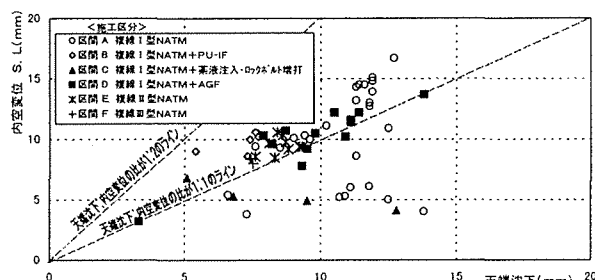


図-5 天端沈下と内空変位との関係

これらの計測実績から、当地盤特性やトンネル挙動の特徴を列記し、考察を加える。

- ①地表面沈下とトンネル天端沈下の挙動は、ほぼ相似曲線を描く。ここで絶対変位量を比較すると、地表面沈下1.0に対し、天端沈下0.63程度となっている。これは、当トンネルのように土被りの小さいところでは、掘削と同時に周辺地山が緩み、その影響が短時間のうちに地表面にまで波及し、共下り現象を起こすものと考えられる。また、絶対変位量を比較してみると、天端沈下より地表面沈下の方が大きい。これは、地表面沈下には先行変位が含まれているためと考えられる(図-2参照)。
- ②地表面沈下における先行変位と最終変位を比較すると、全区間でみると先行変位36%、後行変位64%となっている。しかし、この中でAGF工法のような強

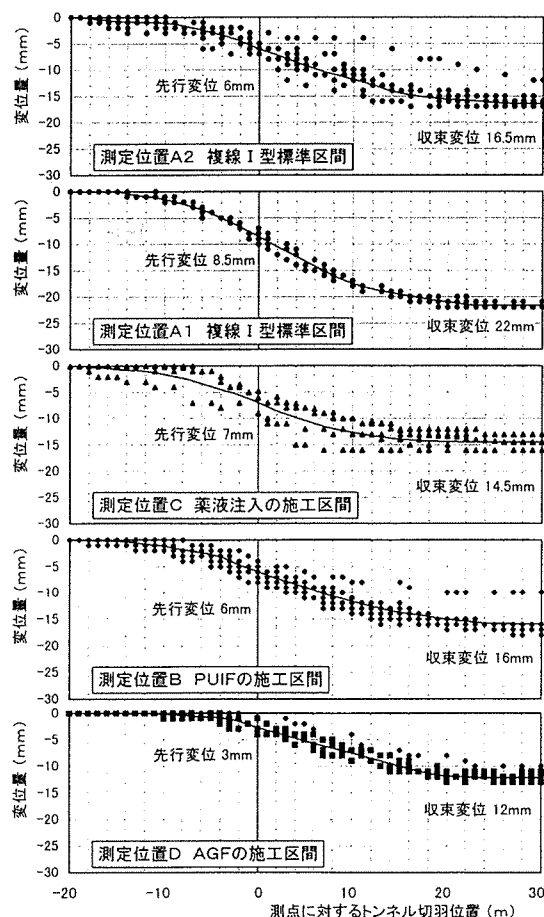
制力の大きい補助工法を採用したところでは先行変位22%、後行変位78%で、先行変位抑制効果が高いことが伺える。複線標準部区間においては、一般的に先行変位40%、後行変位60%が妥当と考えられる。これらの値は、以後の掘削における予測解析やフィードバック解析の応力解放率の設定に活用している(図-3参照)。

- ③トンネル直上における地中変位は、各深さ別に曲線が違うが、ほとんど同一の相似形を描く。トンネル近傍ほど変位量が大きく、地表面近傍になるとトンネル近傍の75%程度に減少する。切羽前方1D前から変位が発生し始め、切羽後方2D~3Dで収束する傾向が伺える(図-4参照)。
- ④天端沈下と内空変位の関係は、土被りの充分ある完全弾性体では理論上、1:2で対応する。しかし、当トンネルにおいては1:1.1で対応する結果となっている。つまり、天端沈下が内空変位よりもかなり卓越するという結果が出ている。これには2つの理由が考えられる。1つは土被りが平均10mと小さいため、グランドアーチの形成が困難であり、トンネル上部の荷重が緩み荷重として作用しやすいことである。もう1つはトンネル断面をより経済的に設計するという観点から、上部の不必要空間を極力削った扁平断面で計画されているためである(図-5参照)。

さて、次に、補助工法の効果を確認する手段として計測工Aのデータを利用する。当トンネルで採用した主な補助工法は、薬液注入工法、PU-IF工法、AGF工法の3種類である。これに複線の標準部を加えた4種類の区間の地表面沈下における沈下特性曲線を図-6に示す。これらのデータから、補助工法の効果を定量的に把握しようと考えた。着目する要素は、先行変位量、収束変位量の2要素である。これらの結果を集約したものを表-1に示す。

3つの補助工法を採用した区間が、補助工法を用いなかった区間(複線標準部)に対して、どの程度の効果があったのかを表す指標として応力解放率と先行変位抑制率を求めた。これらの結果から以下のことが判明した。

- ①薬液注入工に関しては、応力解放率48.3%、先行変位抑制率17.6%で複線標準部と比較しても、地山改良効果は現れていない。この理由は、二重管複相による溶液型の薬液注入工であり、地山改良効果よりも止水効果をねらった注入であること、また、沖積層と古第三紀層の層境に重点的に注入され、著しい地盤隆起が発生し、設計量の20%(対象土量の2%)の注入量で中断せざるを得なかったこと等による。
- ②PU-IF工法に関しては、複線標準部(地山不安定)区間の隣接区間であり、この両者の変位量を比較すると先行変位量8.5mmから6.0mm、収束変位量22.0mmから16.0mmとかなり抑制されていることが



図－６ 補助工法による沈下の特性

表－１ 変位量の比較

区 間	記号	区間長 (m)	先行変位 (mm)	収束変位 (mm)	応力解放 率 θ $a/b \times 100$	先行変位 抑制率(%) (1-B,C,D/A) * 100
複線標準部(地山安定)	A	210	6.0	16.5	36.4	—
複線標準部(地山不安定)	A	63	8.5	22.0	38.6	—
薬液注入工法 区間	C	57	7.0	14.5	48.3	17.6
PU-IF工法 区間	B	56	6.0	16.0	37.5	29.4
AGF工法 区間	D	128	3.0	12.0	25.0	50.0

分かる。先行変位抑制率は29.4%である。

- ③AGF工法に関しては、複線標準部（地山安定）区間の隣接区間であり、この両者の変位量を比較すると先行変位量6.0mmから3.0mm、収束変位量16.5mmから12.0mmと抑制効果が高いことが伺える。応力解放率25.0%、先行変位抑制率50.0%という値が示すように他の補助工法と比較しても群を抜いている。

以上、総合的に見ると、当トンネルにおける補助工法の効果は、以下の範囲内であろうと推定される。

- ・薬液注入工法……………10～15%
- ・PU-IF工法……………25～30%
- ・AGF工法……………45～50%

ただし、これらの数値には、地山の良否が考慮されていないので、本来は切羽観察による地山評価を変位量に反映させる必要がある（図－２参照）。

§ 5. 評価および考察

5-1 設計・施工へのフィードバック

設計・施工へのフィードバックの手順は、まず桜坂側の(1)計測工実績（延長 $L=548.9\text{m}$ ）を基にして薬院側の予測（延長 $L=203\text{m}$ ）を行う。この予測には薬院側の地盤情報を活用しながら(2)計測工による予測解析と(3)FEMによる予測解析という2つのアプローチを試みた。次に(4)当初設計の補助工法（主に薬液注入工法）が総合的に判断して、当地盤に不向きであることを検証し、その代案として最適な補助工法（AGF、AGP、PU-IF工法）を提案し施工を行ったものである。

(1) 計測工の実績

表－２ 既施工区間の計測結果一覧

測 点	掘 削 タイプ	補助工法	地表面 沈 下	トンネル 天端 沈 下	トンネル 内空 変 位	地表面 傾斜角	周辺への 影 響
単 位			mm	mm	mm	$^{\circ} \times 10^3 \text{rad}$	
9k865m	複Ⅰ	薬 注	-16	-12.8	-4.0	1.2	路面クラック
9k835m	複Ⅰ	AGF	-6	-6.1	-1.2	0.3	
9k800m	複Ⅰ	—	-18	-13.6	-3.6	1.8	路面クラック
9k733m	複Ⅰ	—	-17	-12.7	-16.9	1.9	クラック発生
9k653m	複Ⅰ	増しボック	-22	-12.0	-15.1	2.1	路面クラック
9k603m	複Ⅰ	PU-IF	-16	-7.8	-10.3	1.8	
9k543m	複Ⅰ	—	-15	-9.4	-11.0	1.7	
9k453m	複Ⅱ	—	-14	-8.8	-9.2	1.3	
9k413m	複Ⅲ	—	-9	-7.3	-8.5	0.9	

表－２から、地盤全体が共下りしている区間（天端沈下が10mm以上）及び地表面傾斜角が $1.8 \times 10^3 \text{rad}$ 以上の場合には、構造物や路面へのクラックが確認されている。したがって、複線標準型を掘削する場合は、一般的に地表面沈下は16mm以下、トンネル天端沈下は10mm以下、地表面傾斜角は $1.5 \times 10^3 \text{rad}$ 以下に押さえることが必要不可欠である。

(2) 計測による変位予測

ボーリングコアやトンネル掘削により採取した試料は岩石の評価であり、岩盤の評価としては適切ではない。そこで地山試料試験の超音波伝播速度（ v_p ）とその採取箇所付近の切羽における弾性波速度（ V_p ）を探索し、両者の対比を行った。その結果、岩盤の弾性波速度は岩石の51%程度（低減率 $=V_p/v_p$ ）であった。

岩盤内の亀裂が無視できる場合には、岩石の一軸圧縮強度を岩盤の強度として活用できるが、亀裂の影響を受ける岩盤においては、準岩盤強度 σ_c （ N/mm^2 ）を用いて評価する。

$$\sigma_c = (V_p/v_p)^2 \times q_u$$

V_p : 地山の弾性波速度 (km/s)

v_p : 供試体の超音波伝播速度 (km/s)

q_u : 供試体の一軸圧縮強度 (N/mm^2)

例えば測点9k865mでの準岩盤強度は、地山試料試験

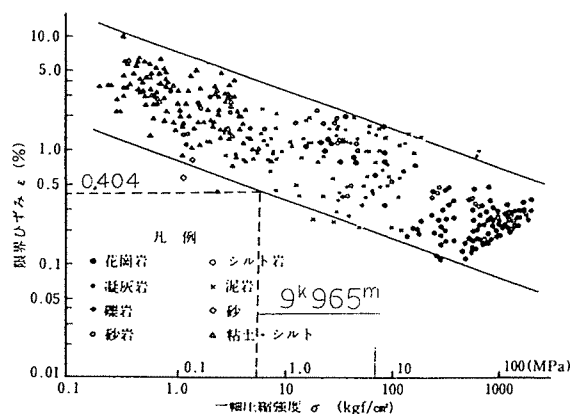
結果と上式より46,410 N/mm²となる。他の測点も以下同様の計算を行う（表－3参照）。

表－3 準岩盤強度と限界ひずみ

測 点	超音波 伝播速度 (km/s)	換算弾性 波速度 (km/s)	一軸圧縮 強度 (N/mm ²)	準岩盤 強度 (N/mm ²)	限 界 ひずみ (%)
9 k865m	1.556	1.05	10.192	4.641	0.221
9 k965m	0.860	0.44	2.940	0.770	0.404
9 k992m	0.360	0.18	4.214	1.054	0.362
10k069m	—	—	0.108	0.028	1.195

岩盤の限界ひずみと強度の関係には、一定の幅があることが経験的に確認されている（図－7参照）。そこで表－3の準岩盤強度に対して地山の限界ひずみを次式により計算する。

$$\epsilon_p(L) = 0.8 \times \sigma_c^{-0.333}$$



図－7 一軸圧縮強度と限界ひずみの関係¹⁾

この限界ひずみから各測点における限界変位量を求め、変位率を乗じて予想変位量を算出した（表－4参照）。

表－4 予想変位量

測 点	9 k865m	9 k965m	9 k992m	10k069m
強度 (N/mm ²)	4.641	0.770	1.054	0.028
限界ひずみ (%)	0.221	0.404	0.362	1.195
掘削幅 (m)	9.5	9.5	11.4	9.5
限界変位量 (mm)	21.00	38.40	41.27	113.53
実変位量 (mm)	16	—	—	—
変位率 (%)	76	76	76	76
予想変位量 (mm)	—	29.2	31.4	86.3

以上より、薬院西側の複線標準型（9k965m）の地表面沈下量は、約30mmと考えられる。

(3) FEMを用いた予測解析

次に、薬院西側（9k965m地点）のFEM予測解析では4ケース（無支保、薬液注入、PU-IF、AGF）に分け、2次元弾・塑性解析を行った。地盤の挙動を的確に表現するため、検討対象地点における調査ボーリング実績より算出した地盤定数および条件を基に解析を行った。初期

応力については土被り相当の鉛直応力と側圧係数は $K=0.5$ を採用した。また、掘削相当外力の解放率に関しては、現在までの施工実績（先行変位の比率≒40%）により、地山の応力を素掘り状態で40%解放し、残りの60%を一次覆工後に解放することを基本とした。表－5に予測解析結果を示す。

表－5 9k965m地点の解析結果

項 目	管 理 基準値	Case1 Case2 Case3			
		無 支 保	薬液注入	PU-IF	AGF
地表面沈下量 (mm)	-30.0	-27.1	-13.3	-12.7	-10.2
地表面傾斜角 (rad)	0.001	0.0026	0.0014	0.0014	0.0011
天端沈下量 (mm)	-24.0	-53.9	-26.2	-24.4	-17.9

この結果、以下に示すことが判明した。

- ①各補助工法の沈下抑制効果は、Case1, 2, 3の順に地山に反映され、トンネル掘削に伴い生じる地山の变位・変形は抑制される。
- ②トンネル掘削に伴う地山の变位・変形を抑制するためには、Case3のAGF工法が最も優れている。しかし、地表面傾斜角はわずかながら許容値を越える。
- ③解析上は天端沈下が地表面沈下よりも卓越するが、実際はほぼ同じ値となっている。これは、解析では弾性変形や緩み領域はトンネル掘削周辺が大きく出るため、また、トンネルの土被りが10m前後と小さいためグラウンドアーチの形成が不十分であり、トンネル上部の地盤全体が共下り状態となって地表面に反映された結果であると考えられる。

以上のことより、薬院西側の9k965m地点の事前解析における地表面沈下量は、あくまで解析上の数値であり、実際には、地質が劣悪になるにしたがい、その天端沈下量に見合う結果が生じる可能性が高い。つまり、AGF時約18mm、PU-IF時約24mm、薬液注入工時約26mm程度の地表面沈下が発生すると予測される。

(4) 岩盤部への薬液注入工の実績

立坑部前における薬液注入工の効果について検証した。この注入形態を整理すると以下ようになる。

- ①堆積岩である頁岩層の亀裂はお互いに平行、かつほぼ水平方向に入っているため、強風化堆積岩への水平割裂注入が主体となっている。
- ②注入された薬液は、一部の限られた亀裂や岩盤部と土砂部の層境界に集中して入っており、まんべんなく岩盤中の有効間隙を置換できていない。
- ③地山本来の透水係数が小さく、実質有効間隙率は10%に満たない。

上記の推定原因により、通常より大きな地盤の隆起（約70mm）が生じたと考えられる。

地山改良効果については、注入後の地山の透水試験や一軸圧縮強度試験結果、あるいはトンネル掘削時の切羽観察調査において確認したが、地盤の著しい改良はあまり見られず、不明瞭な部分が多かった。

5-2 補助工法の選定

地表面沈下、天端沈下、地表面傾斜角の実測値と予測値の比較を表-6にまとめる。

表-6 実測値と予測値の比較

計 測 項 目		地表面沈下 (mm)	天端沈下 (mm)	傾斜角 ($\times 10^{-3}$ rad)	周辺への 影響	
管 理 基 準 値		30.0	24.0	1.0		
実 測 値	薬液注入工	16.0	12.8	1.2	路面クラック	
	P U - I F 工 法	16.0	7.8	1.8	—	
	A G F 工 法	6.0	6.1	0.3	—	
	補助工法なし	16.7	11.9	1.8	路面クラック	
予 測 値	計測工	29.2	—	—	—	
	F E M	薬液注入工	13.3	26.2	1.4	—
		P U - I F 工 法	12.7	24.4	1.4	—
		A G F 工 法	10.2	17.9	1.1	—

計測工の実績に基づく限界値（地表面、構築物への影響が出はじめる変位値、つまり地表面沈下16mm、天端沈下10mm、地表面傾斜角 1.5×10^{-3} rad）も1つの新管理基準値と考え、元管理基準値も合わせて総合的に判断すると、最適な補助工法はAGF工法ということになる。変更内容は表-7の通りである。

表-7 当初設計と変更（補助工法）

区分 タイプ	当 初 設 計		変 更	
	延長	補 助 工 法	延長	補 助 工 法
複線 Ⅰ型	76	地表面から 薬液注入工	6 70	坑内から PU-ⅠF工法 坑内から AGF・AGP工法
複線 特Ⅱ型	28	AGF・AGP工法 φ 76 mm、L=6.0m	28	AGF・AGP工法 φ 114.3 mm、L=9.0m、12.5m
複線 特Ⅰ型	15	AGF・AGP工法 φ 114.3 mm、L=12.5m	15	AGF・AGP工法 φ 114.3 mm、L=9.0m、12.5m
単線 Ⅰ型	11.25	地表面から薬液注入工 坑内から中央導坑有り	11.25	坑内からAGF工法 中央導坑なし
単線 Ⅱ、Ⅲ型	72.75	地表面から薬液注入工	72.75	坑内から PU-ⅠF工法 駅接続部 L=7 m だけ地表 面より薬液注入工

5-3 3次元解析の活用

解析では地山をモデル化するため、解析結果と計測結果は合致しないことが多い。この理由としては、以下のことが考えられる。

- ①地盤物性値（弾性係数等）が設定困難である。
- ②補助工法の効果がうまく考慮できない。
- ③岩盤のクラック等の不連続面が考慮できない。
- ④施工と解析モデルの条件が異なる。

このため、計測などにより地盤物性値の見直し、補助工法の効果を検証した。

地盤物性値を再評価するためフィードバック解析を行った。手法としては弾性解析を採用し、弾性係数を再設定したモデルにより計算を行った。この結果、地盤の弾性係数を2倍程度にした場合に計測結果と合致することが判明した。この地盤物性値の見直しに対して、補助工法は種類も多く効果も異なるため評価が困難である。特にAGF工法などの先受け工法はトンネル縦断方向への支持効果が高く、3次元効果を発揮する。計測結果から、AGF工法による変位抑制効果は45～50%程度であり、一方、2次元解析では変位抑制効果が小さく現れる傾向が

ある（表-8参照）。

表-8 2次元解析AGF変位抑制効果

測点	地表面沈下量		変位抑制効果 (a-b)/a $\times 100$
	AGF無し a	AGF有り b	
9K965M	26.2mm	17.9mm	32%
9K835M	25.4mm	19.0mm	25%

ここでAGF工法等の先受け工法の効果を把握することは、経済性の面からも重要であり、3次元解析を行い、2次元解析との比較検討を行った（表-9参照）。3次元解析では奥行き方向の連続性を考慮するため、2次元解析よりも小さい変位で収束している。また、AGF工法の効果についても顕著であり、実施工の変位と類似しており、その有効性が検証できたと考えている。

表-9 解析結果

結果名	地表面沈下量		変位抑制効果 (a-b)/a $\times 100$
	AGF無し a	AGF有り b	
3次元解析	18mm	10.0mm	44%
2次元解析	29mm	21.9mm	24%
計測結果	(16mm)	8mm	45～50%

注（）内の数値を求めた位置は解析位置と異なる

§ 6. おわりに

当初、困難な掘削が予測された薬院西側の工事は、桜坂側（既施工区間）の施工実績を基に薬院西側（未施工区間）の予測解析を実施し、当初設計の修正と最適な補助工法の選定によって実施工に結びつけることができた。

この中でも特に複線特I型の最小土被り（7.8m）部は、慎重かつ細心の注意を払いながらの施工となったが、AGF工法等の補助工法を採用することによって、地表面沈下量22mm、内空変位量14.6mm、地表面傾斜角 1.5×10^{-3} radに抑えることができた。

当工事では、さまざまな計測工を駆使することによって、地盤の挙動をリアルタイムに正しく把握でき、また、小土被りの都市NATMにおける補助工法の有効性のある程度定量評価できたものと考えている。今後、これらの貴重なデータは、類似トンネルの設計・施工にフィードバックすることがより大切であると考えられる。

最後に、今回の施工にあたりご指導いただいた関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，P145，1993。