

都市トンネルにおける
CD-NATMの施工・計測管理手法
THE PERFORMANCE AND FIELD MEASUREMENT CONNTROLLING METHOD OF CD-NATM IN URBAN TUNNEL

大森喜三雄* 岡野成敏** 山田文孝***

Kimio OOMORI, Sigetosi OKANO AND Fumitaka YAMADA

TUKISAMU tunnel is a shallow urban tunnel excavating under the houses and the main street (route36) at the depth of 16.5m(1.4D)~9.0m(0.8D) below ground surface. Geological condition is volcanic ashes, ashy silts and gravels downward from ground surface, all of which don't harden. We choose 3 bench CD-NATM under these severe conditions.

The field measurement is very significant particularly at this site because of the severe conditions. We planed a highly accurate field measurement controlling method and devised a method of back analysis.

Ground settlement increased as going down of silts which behave as caplock and controll it. We try elastic-plastic analysis and explain the effect of caplock.

Keywords: urban tunnel, CD-NATM, field measurement, back analysis, caplock

1. はじめに

札幌市地下鉄東豊線延長工事における月寒トンネル工事は、第四紀洪積世の未固結地山中を土被り0.8~1.4Dで施工するという典型的な都市トンネルである。本トンネルは施工延長638mのうち前半の約330mは密集した民家直下を、また後半は幹線国道36号直下を掘削するもので、土被りは坑口付近の16.5m(1.4D)から終点の9.0m(0.8D)まで徐々に薄くなる。地質は上位から火山灰、火山灰質シルト、砂礫で構成されている。掘削対象は砂礫層であるが、工区後半では一部火山灰質シルト層が掘削断面中に出現する。以上のような厳しい条件下でのトンネル施工となるため、掘削工法として地山変形の拘束効果の大きい3段ショートベンチカット中壁式(CD)NATMを採用し施工に臨んだ。

NATMでは計測工が重要な位置を占めるが、本トンネルは厳しい条件下の施工であるためその比重は極めて大きい。そこで各施工段階での地山状況を的確に把握するために精度の高い計測管理手法を考案し、特に逆解析手法に工夫を凝らした。

* 札幌市交通局技術部建設事務所長

** 正会員 三井建設株式会社土木技術部

*** 正会員 三井建設株式会社技術研究所

2. 地形、地質概要

地下水は、上位の火山灰層中に、下位の火山灰質シルト層を不透水層として存在する。また、起点付近には望月寒川があり、これによる影響を掘削開始から約30m区間受けたが、他の区間は地下水位がトンネルより下位にあり問題はなかった。

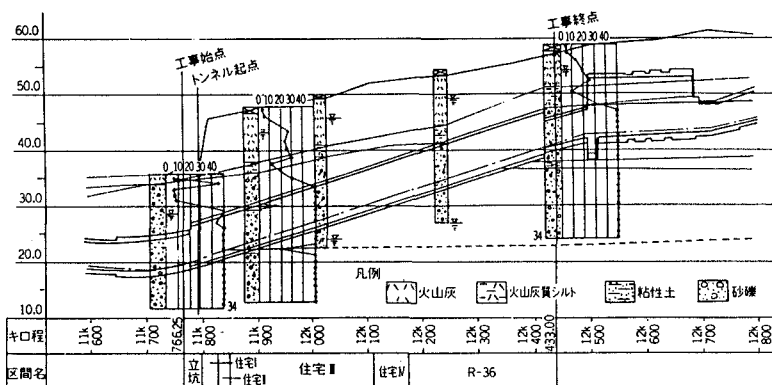


圖-1 地質縱斷圖

3. トンネル工事概要

以上のように厳しい条件下の本トンネルは、地山の緩みを最小限に抑えることが絶対条件となる。このため、昭和63年に実施した試験施工のデータとFEM解析結果等から種々の検討を行なった。その結果は次のとおりである。

- ① 掘削工法は地山の拘束効果の大きい中壁式（ＣＤ）ＮＡＴＭとし、掘削方式はバックホウを主体とした機械掘削とする。
- ② 初期変形の大きい土砂山では、鋼製支保工の荷重分担率が大きいことが検証されたため、鋼製支保工（H-200）と吹付けコンクリートを主体とした剛な支保構造とする。
- ③ 切羽の自立高は2.5m以下とのデータから3段ショートベンチカットとする。
- ④ 将来的な地下水の上昇及び地上環境の変化を考慮して二次覆工は厚さ70cm（国道部は60cm）のＲＣ構造とし、さらにウォータタイトとして全周を防水シートで被膜する。

以上より支保パターンを図-3の様に決定した。

4. 施工

当工事の施工に要求された課題は全ての面にわたっての安全確保であったが、特に以下の項目を最重要課題とした。すなわち

- ・地表沈下の抑制
- ・切羽の自立確保
- ・民家、地下埋設物への影響防止
- ・騒音振動を抑制した環境保全
- ・井戸、樹木の枯渇防止

等である。これらを鑑み、早期閉合、重機の作業性確保、吹き付けコンクリートの強度発現時間等を十分考慮して、図-4に示すような施工手順とした。

路線左側に重要構造物が多く存在することから、これまでの実績により後進坑側の地山変位量が相対的に小さいこと、不測の事態に先進坑側から速やかな対処が可能なこと等の理由で右側を先進坑とした。また、各々の加背の高さは試験施工の結果から上段は2.5mとし、中段3.5m、下段3.3mと割振った。

ベンチ長については、断面の早期閉合のため各ベンチ長を極力短くすることとした。上段はフォアパイルの施工をレッグハンマーで行なうため5m、中段はバックホウによる一連の掘削作業がスムーズに行なえることを考慮して8mとした。また、先進坑と後進坑の離れは当初は約30mで計画していたが、計測結果より先進工の変形が収束する前に後進工を施工することが有利であると判明したため4.5~8.1mで施工した。

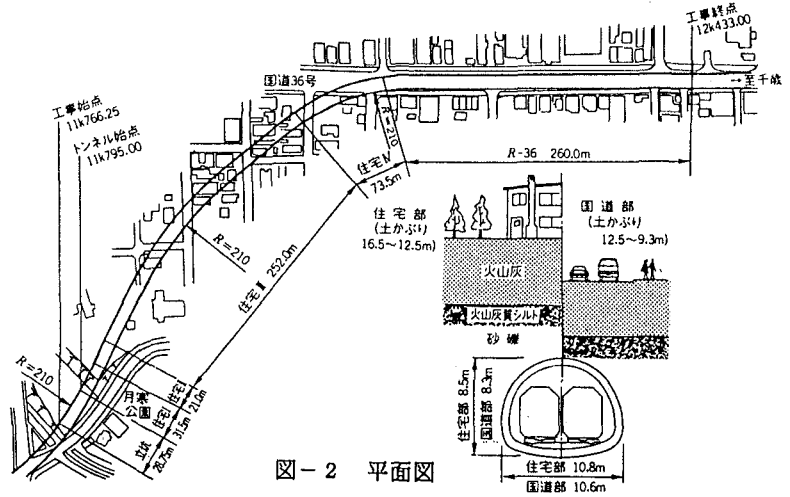


図-2 平面図

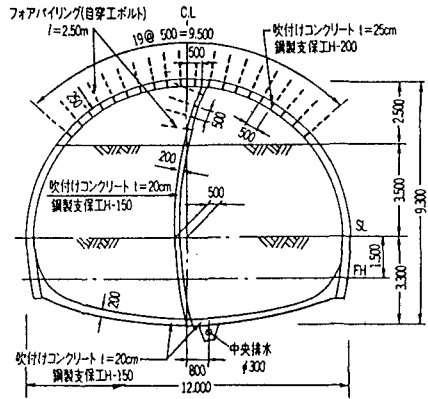


図-3 支保パターン

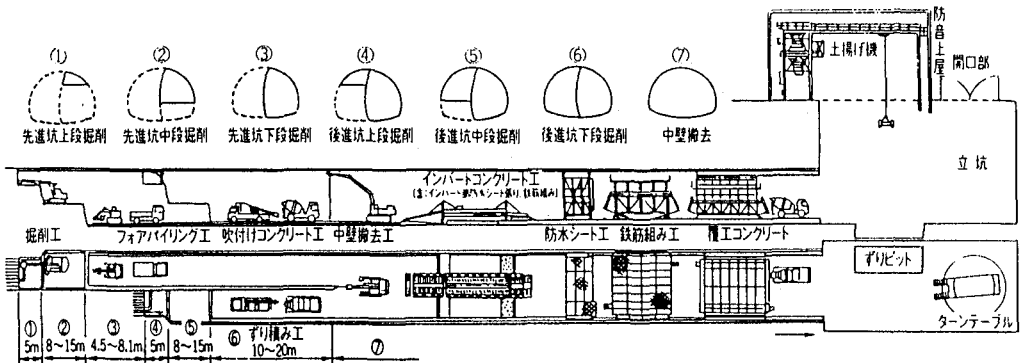


図-4 施工順序図

5. 計測工及び計測管理手法

本トンネルでは切羽の自立性と周辺地山への緩みの拡大が最大の問題点であり、周辺地山を極力緩ませずに弾性範囲内で施工を行なうことが重要であった。このため施工中は周辺地山の健全度を常に把握し、場合によっては状況に応じた対策を迅速に講じなくてはならず、計測工の持つ役割は非常に大きい。また地表まで緩みが達する可能性が大きいという、先に述べたように地表には民家が密集していることから、トンネル構造体の安定性ととも周辺構造物の安全性にも十分な注意を払う必要があった。

そこで本工事においては、

- ・ 工事の安全性を確保する
- ・ 地表及び重要構造物への影響を把握する
- ・ 設計の妥当性を確認し上記二項目へ反映させる

ことを主たる目的として計測を実施した。

一般にトンネル掘削に伴う地山の変位は切羽到達以前に既に発生している。特に、本工事のような未固結地山は先行変位量が大きく、これを含んだ全変位量により管理を実施しなくてはならない。そのため、坑内の計測Aのほかに、坑外や地表からの計測も実施した。

本工事では地上構造物への影響を把握することは極めて重要な問題であるため、トンネルに近接する構造物を選び建物内に傾斜計を設置した。

また、支保構造の応力測定と二次覆工応力測定も実施した。

計測値に対する管理手法として「直接ひずみ制御法」を用いた。限界ひずみは、掘削対象となる砂礫層ではサンプルによる一軸圧縮試験が不可能であるため、孔内載荷試験の結果を用いて決定した。また地質状況が変化し、シルト層が掘削断面中に下降した国道部分では、切羽からシルト層のサンプルを採取し一軸圧縮試験を実施してシルト層の限界ひずみを新たに設定し、より緻密な計測管理を実施した。

地表沈下の最終変位量は変形の初期段階で予測することが必要である。そのため、先進坑の計測結果の他に切羽観察による地質データ、既知の情報データ等を用いて線形重回帰分析を行ない、相関性を求めること

表－1 管理基準

管理レベル	天端沈下(mm)	内空変位(mm)	限界ひずみ(%)
管理レベルⅠ	～22	～44	～0.4
管理レベルⅡ	22～33	44～66	0.4～0.6
管理レベルⅢ	33～	66～	0.6～

とした。その結果、「最終地表沈下量」と「先進坑上・中段の水平内空変位」、「土かぶり」による回帰式が相関係数0.9以上となり、この値を目安にして施工管理を行なった。¹⁾

6. 逆解析

先にも述べたように未固結地山ではトンネル掘削に伴う先行変位量が大きい。また、CD-NATMでは切羽が上下左右に6箇所も存在し、先進坑が後進坑へ及ぼす影響が無視できない量になる。通常の2段階ベンチカット工法では、上半の施工によりトンネルの全幅を掘削するため各点の測定値をそのまま用いて逆解析を行なえる。本工法の場合には、図－5の測点T1、C1の測定値は掘削開始からの全変形量であるが、他の測点は先進坑上段掘削時点で既に動いており、その測定値は掘削以後の動きであるため、実測値を解析に用いることはできない。

この問題に対し、各測定値に次のような補正を行なうこととした。先進坑2段目以降の逆解析に用いるT2～T5、C2～C8の変形量{D}は

$$\{D\} = \{D\} + \{d\} \quad \{D\} : \text{実測値}$$

{d} : 前解析ステップの逆解析結果における同位置の算出変形量

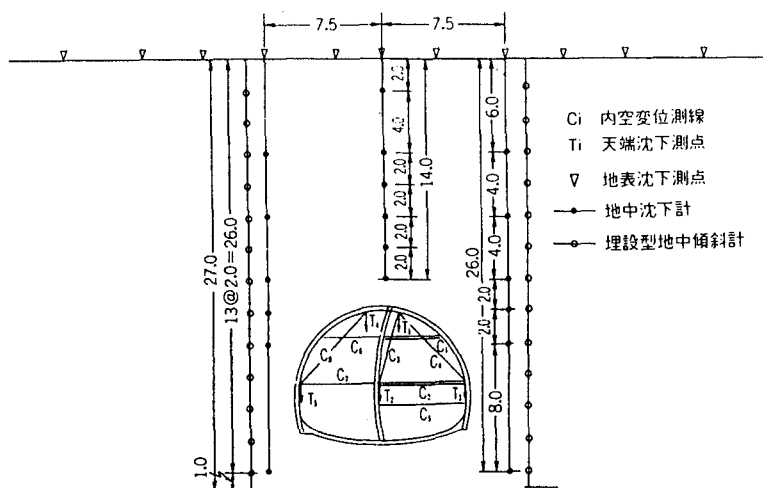


図-5 計測パターン

とし、{d}を初期・先行変位とみだてて解析を行なった。この手法の解析精度を確認するために、掘削開始直後の住宅部と地層構成が変化する国道部に主計測断面を設定した。ここでは図-5のように地中変位計と地表沈下測点を配置し地山の変形モードと変形量をチェックした。

上述した補正変形量を用いた逆解析は十分に満足のいく結果であり、特に3方向地中変位計測による地山の変形モードとは精度の高い結果を示した。2)

7. 地表沈下とその評価

本トンネルは前述の通り掘削が進むにつれ徐々に土被りが薄くなるため、地表沈下がある程度増大することは施工以前から予測されていた。特に国道36号下ではキャップロックとして地表沈下抑止に寄与と思われるシルト層が、トンネルが登り勾配であるため相対的に下降し、掘削断面内に1mほど現れることが調査の結果から想定されており、キャップロック効果が弱まるものと考えられた。

実際のシルト層の下端位置と、地表沈下量の推移を図-6に示す。シルト層下端は12k180~12k360は予想線よりも大きく降下しており、これに伴い地表沈下量も増加した。地表の構造物に影響はなかったが、これは以前には見られなかった現象であり、地表沈下計測点の増設・計測頻度の増加等の対策を講じた。

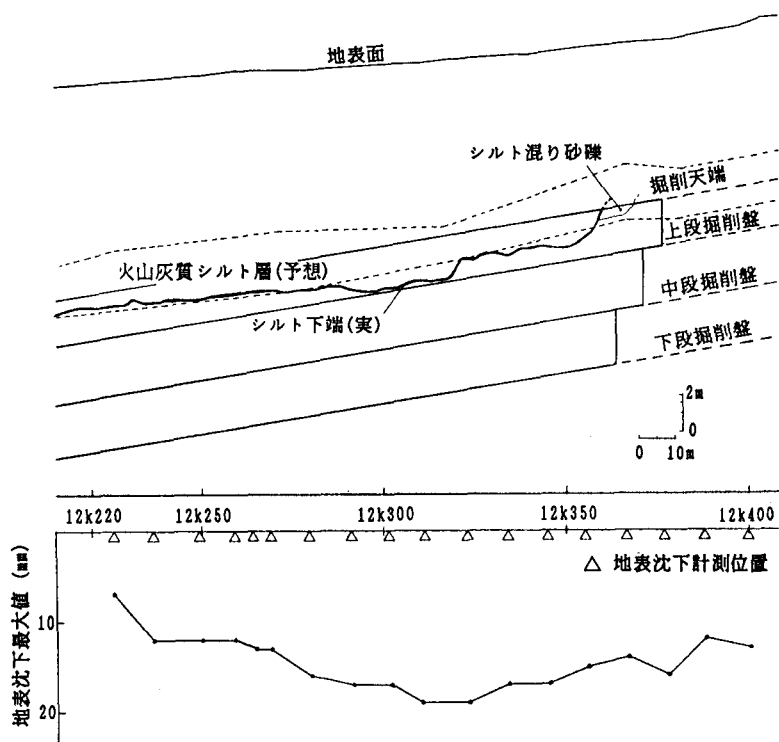


図-6 シルト下端位置と地表沈下の推移

本トンネルではシルト層の掘削断面に対する被りと地表沈下量の増減が非常によく相関しており、キャップロック機構解明のためのケーススタディとなり得る。シルト層は砂礫層に比べて弾性係数が小さく、通常の弾性解析ではその効果を把握することは不可能である。そこで筆者らは天端上方にシルト層が存在する場合としない場合の2ケースにつき弾塑性解析を試みた。物性値は各種試験の結果を考慮して定めた。掘削の最終状態における塑性域図を図-7に示す。Aはシルト層が存在しない場合であり、Bは存在する場合である。塑性域は、シルト層が存在しない場合には上位の火山灰層まで伸びているのに対し、存在する場合にはシルト層に阻まれた形で砂礫層内のみに分布する。このとき地表沈下量は約6割に抑制されており、12k237における計測値とほぼ一致する。

すなわち、キャップロックとしてのシルト層は粘着力が大きく容易に降伏したため、掘削の進行に伴い増加する塑性変形を抑制する働きをするが、シルト層が存在しない場合には粘着力を持たない上位の火山灰層の塑性変形が増大し地表沈下量も増加する。これがシルト層のキャップロック効果であると考えられる。

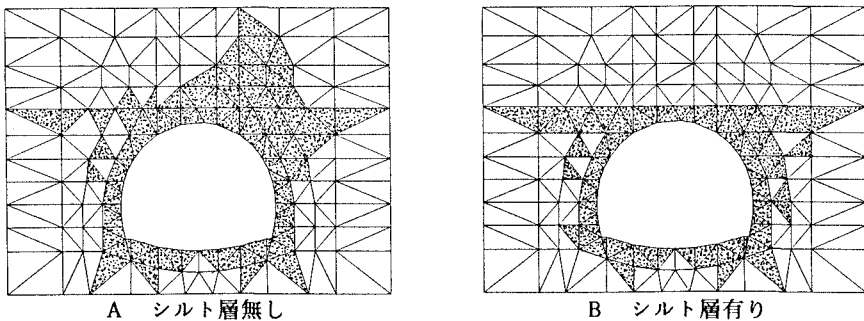


図-7 塑性域図

8. おわりに

本トンネルは民家及び幹線国道直下の未固結砂礫層中を土被り1D前後で掘削するという典型的な都市トンネルであった。この様な厳しい条件の中、CD-NATMを採用して施工を行なったが、きめ細かい計測管理によりトンネルの安定性や地表構造物の安全に重大な影響を与えることなく無事掘削を終了した。

本工事ではひずみによる計測管理を実施したが、加背の多い掘削法の計測管理は、先行変位量を考慮した逆解析手法が有効であることが確認できた。また、キャップロックとして機能していたシルト層を掘削した事により地表沈下量は増加したが、地上構造物への影響はなかった。ここで弾塑性解析を実施し計測値との比較を行なうことで、粘着力が大きく塑性しにくい地層のキャップロック機構が解明できた。これらは都市NATMにおいて重要な問題であり、今後もさらに研究を進めていく所存である。

最後に、貫通まで無事に施工できたのは、関係各位のご指導・ご協力の賜と深く感謝する次第である。

9. 参考文献

- 1) 相馬英敏・岡田正之・岡野成敏：市街地直下の未固結地山におけるCD-NATM，土木学会北海道支部論文報告集，平成3年度。
- 2) 大森喜三雄・岡野成敏・角丸義浩：市街地・砂礫地山における中壁式NATM（月寒トンネル）の施工・計測管理について，土木学会第46回年次学術講演会（平成3年9月）。
- 3) 櫻井春輔・足立紀尚：都市トンネルにおけるNATM，鹿島出版会。