

I - 46

未固結地山におけるトンネル挙動に関する一考察

三井建設(株) 土木技術部 正員 岡野 成 敏
北海道開発コンサルタント(株) 正員 岡田 正 之

1. はじめに

都市トンネルは従来、シールド工法及び開削工法が主流であったが、十数年前のNATM導入以来、山岳トンネル工法の技術進歩は目覚ましいものがあり、今や都市NATMとして都市トンネル工法の地位を築くに至った。特にNATMの有する合理性、安全性および経済性は普及の過程で種々の技術的研究・開発の成果を生み出し、その結果ほとんどの地質条件に適合するまでになった。

都市NATMでは掘削対象が主に第四紀洪積世の未固結地山であり、トンネルの性格上土被りが薄く、更に地上の市民生活に支障を与えることはできない。そのため掘削工法として各種の分割掘削工法が試行されそれぞれの地山への適性が明らかになってきている。更に、補助工法と計測工の飛躍的な進歩は地山変形の抑制と工事の安全性を保证するまでになっている。NATMでは計測工が重要な位置を占めるが、都市NATM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。

本稿では、代表的な都市NATMである札幌市地下鉄月寒トンネル工事の計測結果からCD-NATMの特徴を整理し、当工事で採用された分割掘削工法における逆解析手法を報告する。また、当工事では粘性土層がキャップロックとして地表沈下抑制に寄与していると考えられ、弾塑性解析を実施し計測値との比較を行い、その効果を明らかにした。

2. CD-NATMの挙動の特徴

都市NATMは地上や周辺環境への制約条件が厳しい都市トンネルにおいては、開削工法やシールド工法に比べ多くの利点を有している。しかしながら掘削対象地山が低強度未固結で土被りが薄い場合、切羽の不安定性と地表沈下の増加が大きな問題となる。特に、断面積が80㎡を越えるトンネルでは切羽を確実に保持することが工事の安全と地山の变形を小さく抑えることとなるため、掘削工法として一次閉合方式、(多段ショートベンチカット方式、サイロット方式そして中壁方式のような分割掘削工法が多く採用されている。しかし、前3工法は施工性、掘削形状等に地山の变形拘束に対し弱点を有している。これに対し月寒トンネルで施工されたCD-NATM(中壁分割掘削工法)

は、一般に

- ①左右分割掘削することにより加背が小さくなり切羽の安定に有利である
- ②縦長の断面で掘削するため、土被りが薄く鉛直土圧が卓越した場合、変形(沈下)に対し有利である。
- ③中壁が支柱の役割を果たすため、アーチ形成までの間、地山に大きな拘束効果が得られる。

等の特徴があり、低土被り未固結地山のトンネルに適用性が高いといわれている。

このようなCD-NATMの利点を月寒トンネルの計測結果から考察してみる。

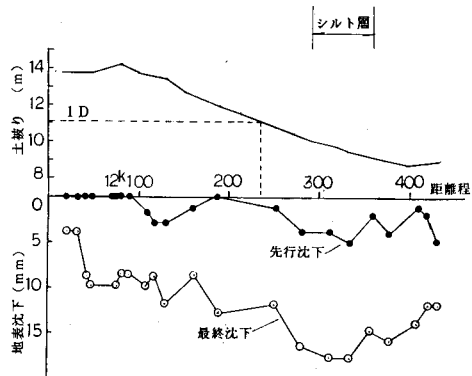


図-1 月寒トンネル地表沈下縦断分布

A Study on the Ground Displacement and the Support Behavior in the Soft Ground Tunnelling
by Shigetosi Okano and Masayuki Okada

2. 1 地表沈下

月寒トンネルの低土被り区間 ($1D \sim 0.8D$, D :掘削幅) における地表沈下の縦断分布を図-1に示す。当トンネルの設計・施工の詳細については既に報告した通りである。^{1), 2)} 地表沈下の要因としては坑内変位, 土被りが大きく寄与しており, 特に土被りの現象に伴い切羽到達前の先行沈下が増加し, 最終沈下量も増加傾向を示した。

文献^{3), 4), 5), 6)}より類似条件下の地表沈下量データを収集し, CD-NATMの沈下傾向を検討した。土被り (H/D) と地表沈下量の関係を図-2に示す。ここでは通常 mountain tunnel 工法で用いられるショートベンチカット (リングカット) 工法のデータと比較した。

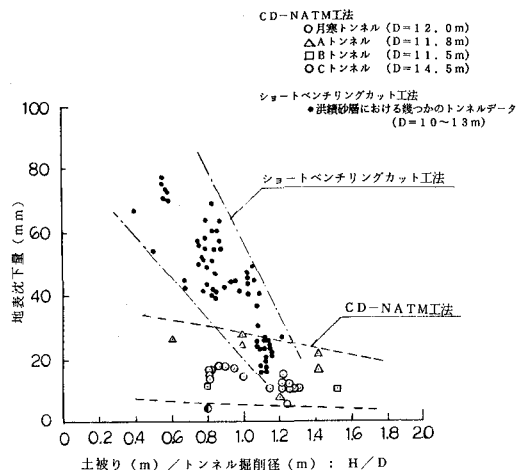


図-2 土被りと地表沈下量の関係

図より地表沈下量が土被りの減少とともに増加する傾向はCD-NATMも同様である。しかしながら, 地山条件等の相違があり一概には言えないが, ショートベンチカット工法の方が, 土被りの減少に伴う地表沈下量の増加傾向は大きいと言える。

このことからCD-NATMは地表沈下に対する抑制効果が大きく, 地上の制約条件の厳しいトンネルへの適用性が高いことが解る。

2. 2 中壁の応力

掘削段階毎の吹付けコンクリートの応力の変化を図-3に示す。先進坑アーチ部 (A) の応力と中壁部 (B) の応力は掘削に伴い両者はほぼ均等に増加し, 後進坑上段掘削時に最大値を示した。その後, 後進坑中段の掘削により (A) の応力は更に増加するが, 中壁部の応力は抜けてほぼゼロに近づいた。これに対し後進坑アーチ部 (C) は増加し, 全断面閉合とともに収束した。

同様に鋼製支保工の軸力の変化を図-4に示す。鋼製支保工も吹付けコンクリート類似の動きをしており両者一体となって挙動していたことが解る。

以上の結果から, 中壁は先進坑掘削時には先進坑の外周支保工と共に地山を直接支保する役割を担っているが, 背面の地山である後進坑が掘削されるのに伴い, 支柱的な役割に移行していくことが解る。そして, 後進坑の支保効果が発揮されるのに伴い, 中壁の応力は (A), (C) へ再配分されていく。このような支保部材の経時変化過程からCD-NATMが鉛直方向変位の抑制に有効であることが解る。

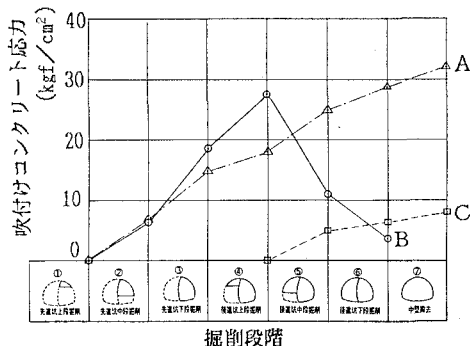


図-3 中壁の吹付けコンクリート応力

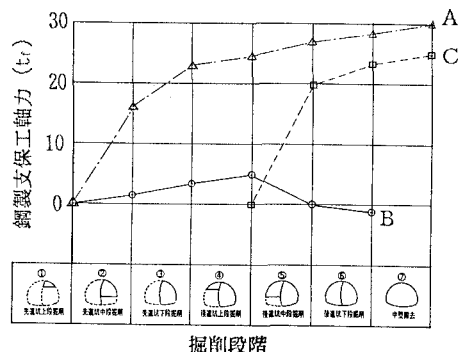


図-4 中壁の鋼製支保工応力

類似条件下のCD-NATMの施工事例でも中壁の挙動はほぼ同様の傾向を示している。そのなかで中壁の応力がゼロになる時期が若干異なるが、これは先・後進坑の離隔距離、中壁の曲率、施工パターンの違いによるものと考える。

3. 分割掘削における逆解析

先にも述べたように都市NATMでは分割掘削が多く採用されており、同時に計測管理手法として逆解析を用いた「直接ひずみ制御法」を採用している場合が多い。通常の2段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。しかし、月寒トンネルのような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は無視できない量である。即ち、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いる。これら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った。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

$$\{D\} = \{D\} + \{d\}$$

{D} : 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

とし、{d}を初期・先行変位とみためて解析を行なった。この補正変形量を用いた手法の解析精度を確認するために、図-6のように地中変位計と地表沈下測点を配置した計測断面を設置し、地山の変形モードと変形量をチェックした。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、図-6のように地中変位計の実測値による地山の変形モードと精度の高い結果を示した。

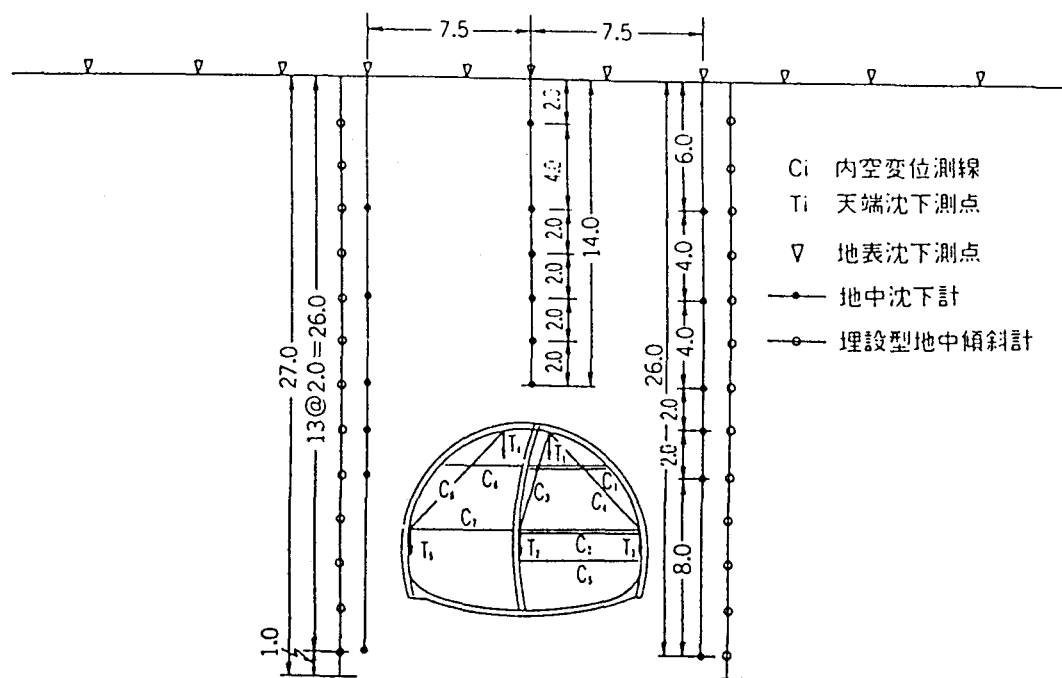
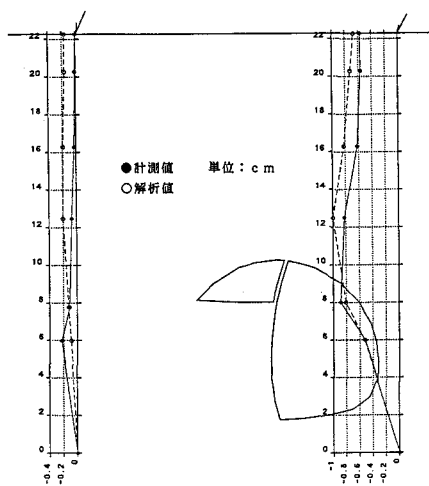
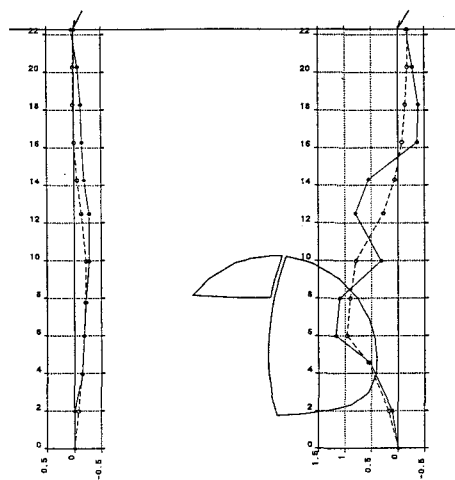


図-5 計測パターン



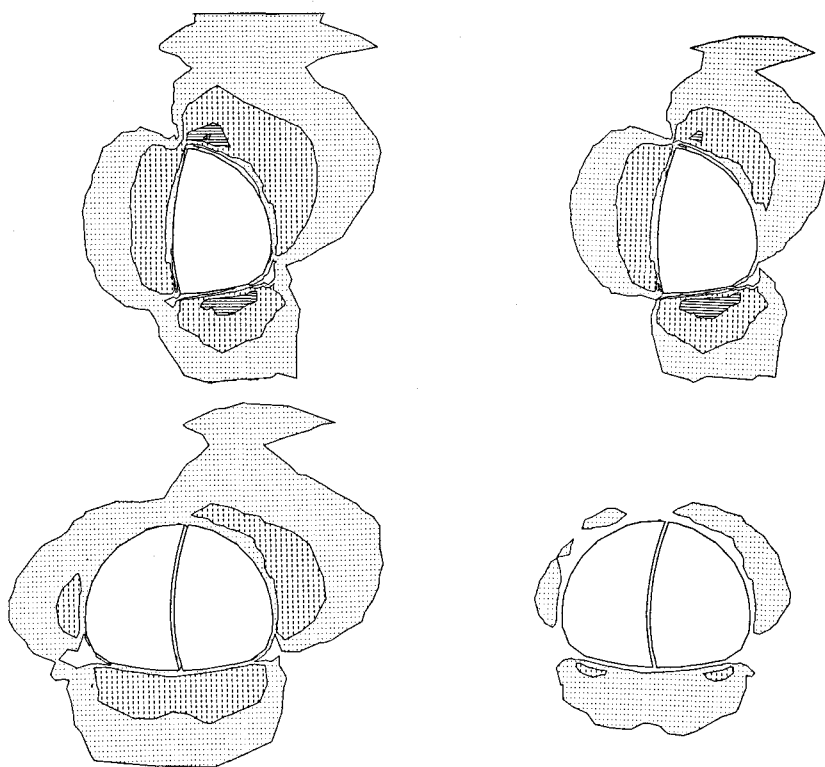
坑外地中変位計測



地中傾斜計測

図-6 補正変形量を用いた解析値と計測値の比較

この補正変形量 $\{D\}$ を用いた解析結果と実測値を直接用いた結果を図-7に示す。



正変形量を用いた解析

実測値のみによる解析

図-7 補正変形量と実測値による逆解析結果比較

4. キャップロックとその評価

月寒トンネルでは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前から予測されていた。特にキャップロックとして地表沈下抑止に寄与すると思われる粘性土（シルト）層が下降し、掘削断面内に1mほど現れることが調査から想定されており、抑止効果が低下すると考えられた。実際のシルト層の下端位置と、地表沈下量の推移を図-8に示す。シルト層下端が想定よりも大きく降下した区間では地表沈下量も増加した。

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、筆者らはキャップロック機構解明のための解析を行った。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ケースについて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-9に示す。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。このとき解析結果では地表沈下量が約6割に抑制され計測値とほぼ一致した。

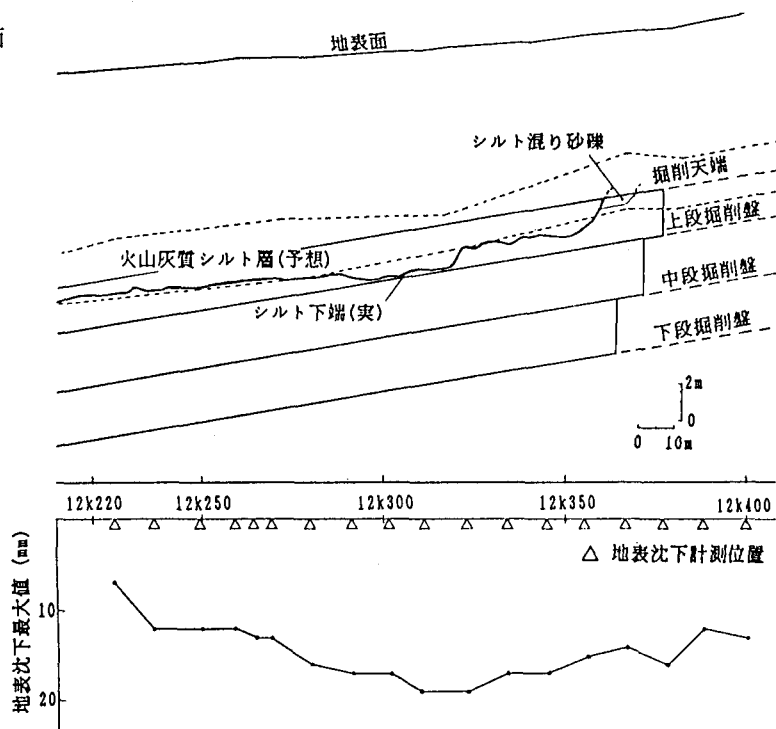
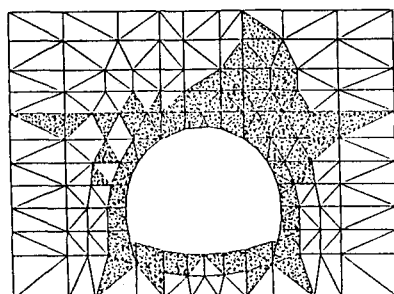
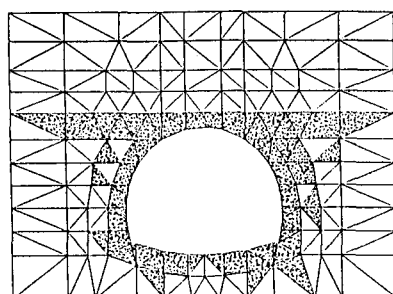


図-8 シルト下端位置と地表沈下の推移



A シルト層無し



B シルト層有り

図-9 塑性域図

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。

5. おわりに

都市NATMが盛んに行われているが、計測の管理手法は掘削が開始して計測データがある程度収集された段階で確立される場合が多い。月寒トンネルにおいても掘削開始から約65m経過後に確立した。都市トンネルの性格上、管理値、管理手法は施工前に決定しておく必要があり、そのためには事前解析の精度を高めると同時に、施工事例のデータによる統計的な予測も有効な方法と考える。

月寒トンネルの逆解析ではここに示したような補正変形量という新しい試みが行われた。本手法の工学的な根拠は若干弱い、現実の地山変形とその管理には非常に有効であった。地山や施工方法の違いにより全てのトンネルに適応はできないが、参考となれば幸いである。

最後に、本稿をまとめるにあたり御協力頂いた日本鉄道建設公団大阪支社木村宏氏ならびに札幌市交通局の皆さまに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 浜塚康宏, 若原嗣男, 高橋彰, 林憲造: 土かぶりの浅い土砂地山における都市トンネルの設計, 土木学会北海道支部論文報告集, 第46号, PP.665~668, 1990.
- 2) 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, 第48号, PP.999~1004, 1992.
- 3) 本多正人, 坂田茂夫, 岡野成敏: わが国初の中壁式(CD)NATM-都・町田市道真米トンネル-トンネルと地下, 第15巻3号, PP.29~37, 1984.
- 4) 瀬戸口忠臣, 高木勇, 永倉彰夫: 土かぶりの浅いシラス地帯の中壁式NATMで挑む一般国道3号鹿児島バイパス武岡トンネル, トンネルと地下, 第19巻7号, PP.55~62, 1998.
- 5) 岡寺勇, 竹内建男, 植松澄夫: 急傾斜地帯の中腹に道路トンネルを中壁式NATMで施工-新宮ハイツ付け道路トンネル工事報告-, 熊谷技報, 第46号, 1989.
- 6) 田口博美, 寺内伸: 特殊条件下における偏平大断面トンネルの施工-東名高速道路(改築)新都夫良野トンネル東工事-, 第 回施工体験発表会, 日本トンネル技術協会, PP.13~22, 1989.
- 7) 横山章, 堀内義朗, 木村宏: トンネル掘削による土かぶりの浅い未固結砂質地山の挙動を特徴づける指標に関する研究, 土木学会論文報告集, 第388号, III-8, PP.161~170, 1987.