

住宅密集地下における大断面交差部の設計・施工

神戸建設局 建設企画部 設計課 関本 宏
大阪建設局 建設企画部 用地調査課 明神 正章
神戸建設局 山手工事事務所 高橋 祐史

要 旨

近年、急速な都市部における社会資本整備が進む中、住宅地に近接した場所における山岳工法を用いたトンネル工事が増えてきている。この背景の一つに、山岳工法としてNATMが普及する中、情報化施工を行うことによって合理的且つ経済的なトンネル建設が可能になってきたことがあげられる。

本文では、断層近傍に位置しかつ住宅密集地下において大断面交差部を有する高取山工区（北行）トンネルの施工事例に着目し、その設計法と施工法を紹介した上で、今後の同様な施工の一助として、得られた計測結果に基づいて考察を行う。

キーワード：トンネル交差，NATM，都市NATM，設計法，数値解析

1. はじめに

高取山工区（北行）トンネルは、阪神高速3号神戸線と7号北神戸線を南北に結ぶ神戸市道高速道路2号線の一部を構成する全長約2kmのトンネルの内、神戸市須磨区の北側坑口のから同市長田区に至る市街地の直下に位置する延長1,243m（内、山岳部511m，都市部732m）の2車線道路トンネルである（図-1-1）。都市部は、土被りが薄く（5～40m）、トンネル掘削の影響範囲と想定される範囲には400戸を越える民家が密集しており、トンネル掘削時の構造安定性の確保は勿論のこと、特に地表面への影響を最小限に抑えることが重要な課題となる典型的な都市トンネルである。

工区終点付近には、当該トンネル本線（掘削断面積：170m²）とダクトトンネル（110m²）が複雑に交差する大断面区間が存在する。同区間は、須磨断層に近傍する軟弱地山条件下にあり、住宅密集地下の土被り18m程度の深さに構築される前例のないトンネルである。

2. 地形・地質概要

当該工区は、「本みかげ」とよばれる六甲花崗岩（淡紅色）を基盤岩として構成されている。トンネルは、坑口（標高60m）から3%の下り勾配にて隣接する長田工区との境界（標高23m）に向かって高取山（標高320m）の南東部の山と谷が複雑



図-1-1 トンネル位置図

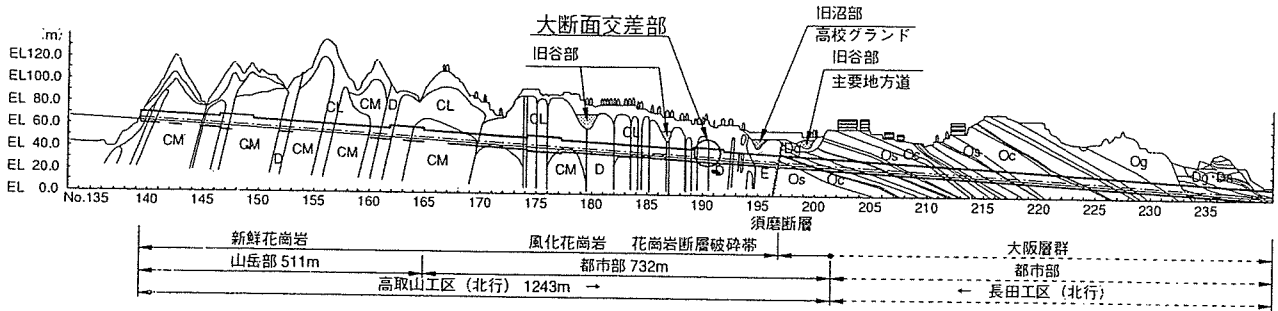


図-2-1 地質縦断面図

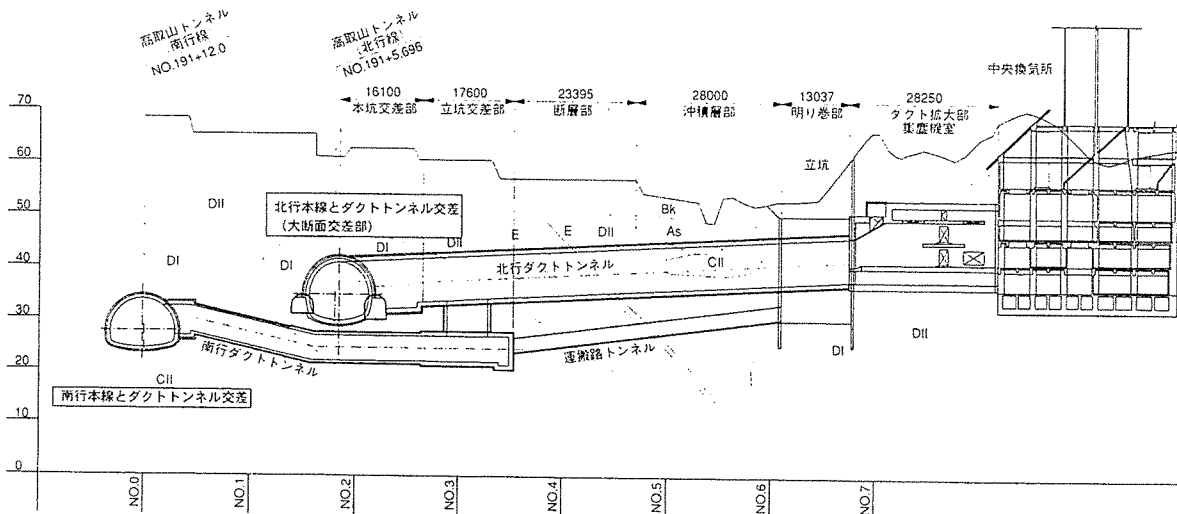
に入り組んだ山腹を通過している。都市部は、みかけの土被りが約20~40mとトンネル標準径 (D=12m) のおよそ2~3倍を有しているが、地表面は谷部を埋め立て造成された平坦な住宅地となっており、旧谷部では元の地山としての実土被りが3~5mと極めて浅くなっている。

工区終点付近に存在する須磨断層は北東から南西に走っており、トンネル線形とほぼ直角に交差している(図-2-1)。地質は断層に近づくほど

断層の影響を強く受けて著しく風化が進んでおり、変形特性、強度特性共に未固結地山より低いものとなっている。調査導坑内にて実施された平板載荷試験等坑内試験結果に基づく、極限地耐力が 1.6 N/mm^2 、変形係数が 40 N/mm^2 が得られている。

風化花崗岩は粘土化が進み、その透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ と小さく、掘削時の切羽の安定性が大きな問題となる湧水は認められていない。

換気ダクトトンネル縦断面図



標準断面図

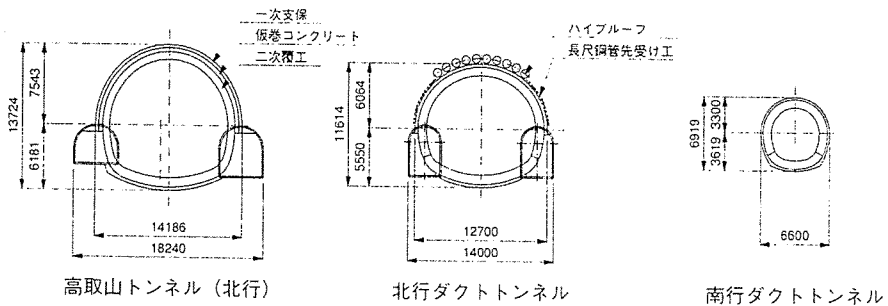


図-3-1 交差部断面図

3. 大断面交差部の設計－施工法

3-1 支保パターンの策定

交差部本線断面については、当該トンネルが横流式の換気方式を採用し本坑内に天井版が布設されることから、本線とダクトトンネルは天端で摺りつくような断面で決定された(図-3-1)。交差部における支保パターンの設計においては、トンネル構造の安定性と地表面への影響抑止に着目して行った。ただし、都市部における大断面交差の前例は乏しく、地表面沈下の抑止に対する設計－施工方法についても確立されていないため、暫定的な一次支保の選定は、主に標準断面部における計測結果から得られた知見に基づいた。その照査については、三次元シェルモデルを用いた解析を用いて構造照査を、三次元FEM解析により沈下照査を行った¹⁾(図-3-2)。

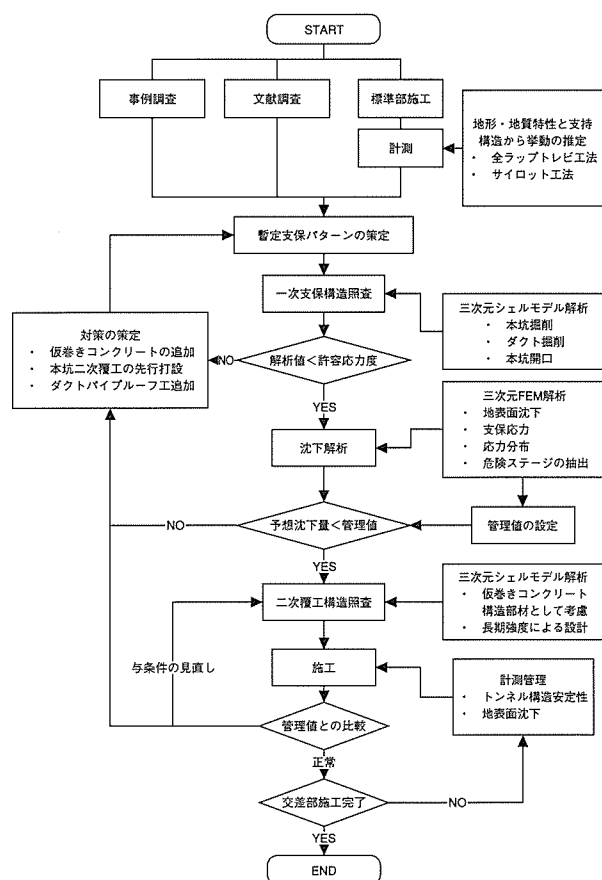


図-3-2 交差部設計フロー

3-1-1 暫定支保パターン

暫定支保パターンの策定には、以下の知見に基づいて行った。

- (1) 天端+先行変位量) 沈下量のおよそ50%程度が掘削による地表面への影響として発生している。
- (2) 天端沈下量で10~20mm, 内空変位量として20~40mm発生している。特に、断層の影響を強く受けた脆弱な地山では、側方からの水平方向の荷重が大きく、鉛直方向荷重とほぼ一致している傾向にある。
- (3) 長尺鋼管に沿った水平傾斜計による計測結果に基づけば、鋼管径や鋼管ピッチの変更に伴う剛性向上の効果に比べ、鋼管が二重となるラップ区間の方が沈下抑止効果が大きく、ラップ区間は、シングル区間に比べ20~40%天端沈下抑制効果が高い(図-3-3)

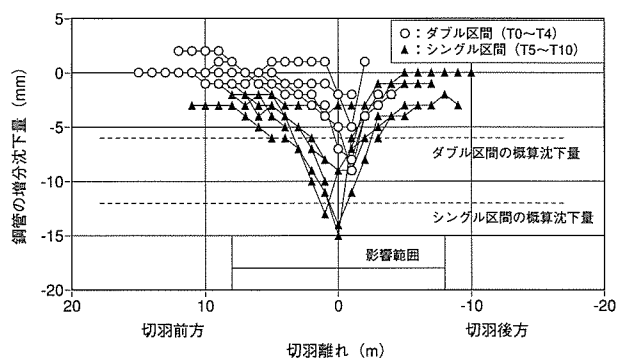


図-3-3 1掘進当りの長尺鋼管の増分沈下(標準部)

- (4) 支保工には、100 t近い軸力が発生しており、脚部沈下量/天端沈下量=0.4~1.0程度で全般的に脚部の沈下が占める割合が大きい。特に、脆弱な地山では、脚部の地耐力不足に伴う沈下の増大及び支保に作用する荷重の増大の発生が懸念される(図-3-4)。

また、標準部における計測結果に基づいて、交差部における地表面沈下量を予測すれば、同大断面区間は、標準区間に比べると、掘削面積がおおよそ $170\text{m}^2/120\text{m}^2=1.4$ 倍、変形係数が $40\text{N/mm}^2/60\text{N/mm}^2=0.7$ 倍、土被りが $20\text{m}/40\text{m}=0.5$ 倍となっており、標準部で採用したものと同様な工法を交差部において採用すれば2倍以上の影響が地表面に

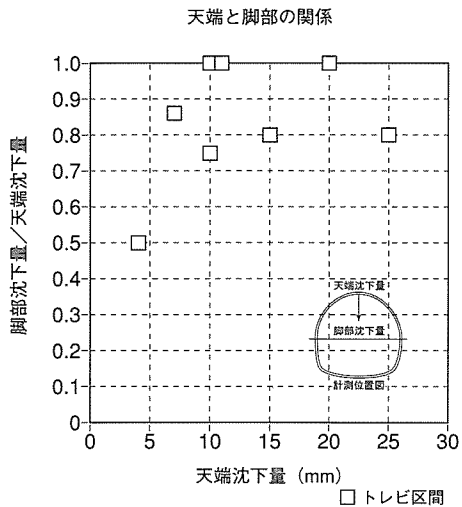


図-3-4 天端-脚部沈下関係 (標準部)

発生することが想定された。このため、交差区間の施工法として新たに下記の工法を採用した。

- ・切羽前方の先行沈下抑止を目的として、長尺鋼管の全ラップ化 (図-3-5)
- ・切羽通過後の沈下抑止を目的としてサイロット工法

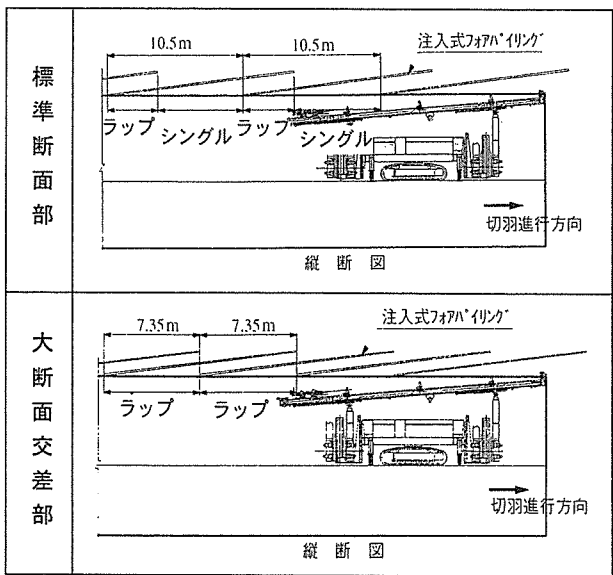


図-3-5 全ラップトレビパターン図

トレビ工法: 専用削孔機を用いる注入式長尺鋼管先受工法1手法。P半掘削に先行して長尺な鋼管を切羽前方に打設し、鋼管内から注入剤を圧入し、鋼管と周辺地山を一体化し、トンネル上半円周状に鋼管による傘(アンブレラ)をかけてその下を掘削する方法。全ラップとは、トンネル直上の鋼管が常に二重になった状態。

3-1-2 解析に基づく構造照査及び沈下挙動照査

トンネル構造照査については、三次元シェルモ

デルを用いて実施した²⁾(図-3-6)。その結果、暫定の一次支保では、本坑開口時に部分的に許容応力を越える箇所が発生するため、仮巻きコンクリート (t=40cm) を一次支保の内側に打設することとした。なお、二次覆工の設計においては、このRC造の仮巻きコンクリートを構造物の一部として取り込んだ設計を行った。

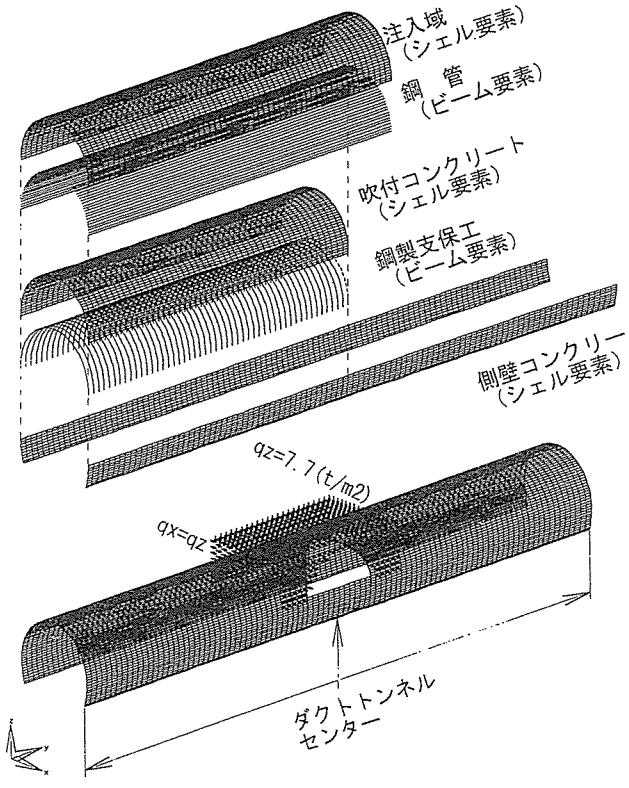


図-3-6 三次元シェルモデル (一次元支保構造照査)

解析に用いた土被り荷重の算定は、テルツァギーの緩み土圧算定式を用いた。本線開口時の緩み荷重は、開口の対角線長を考慮して、緩み高さを割り増ししている。荷重として考慮しているのは、全土被り高さの約75%である13.5mとなった。

沈下挙動照査は、三次元FEM逐次掘削解析(要素数91,278:60ステージ)を用いて行った(図-3-7)。施工法の沈下抑制効果を確認した上で、施工時における計測管理値を設けた。

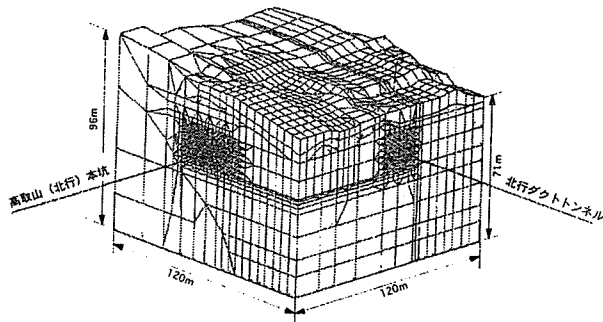


図-3-7 三次元FEM解析(沈下照査)

3-2 施工法の選定

3-2-1 本坑掘削

本線掘削に先行し、先進導坑を掘削し、地質の確認、水抜き、原位置調査を行い、側壁コンクリートを打設した。本坑掘削時の補助工法として、前述したように全ラップトレビによる先行沈下抑止と側壁コンクリートによる切羽通過後の沈下抑止を図った。

3-2-2 南行ダクトトンネル掘削

南行ダクトトンネル(掘削断面積 30m^2)に際しては、交差部の影響範囲外から立坑を下ろし、仮設のアプローチトンネルを掘削し、本坑下、1mの土被りにて施工した(図-3-1)。掘削のための補助工法は、本坑直下部では、本坑インバート部からの垂直縫地とし、それ以外の区間ではフォアポーリングとした。本坑直下通過時は、剛性の高い側壁コンクリートはあるものの、本坑に与える影響を監視しながら慎重に施工を実施した。

3-2-3 北行ダクトトンネル掘削及び交差部開口

北行ダクトトンネルは、土被りが小さい上、湖沼堆積物がトンネル断面内に出現すること、交差部の補強工が本坑側から実施できないことから、補助工法にパイプルーフを選定し、ダクト立坑側から本坑に向けて打設を行った(図-3-8)。また、脚部補強工については、本坑同様、サイロット工法を採用した。交差部開口は、大きな上載荷重が作用していることを考慮して、二次覆工を部

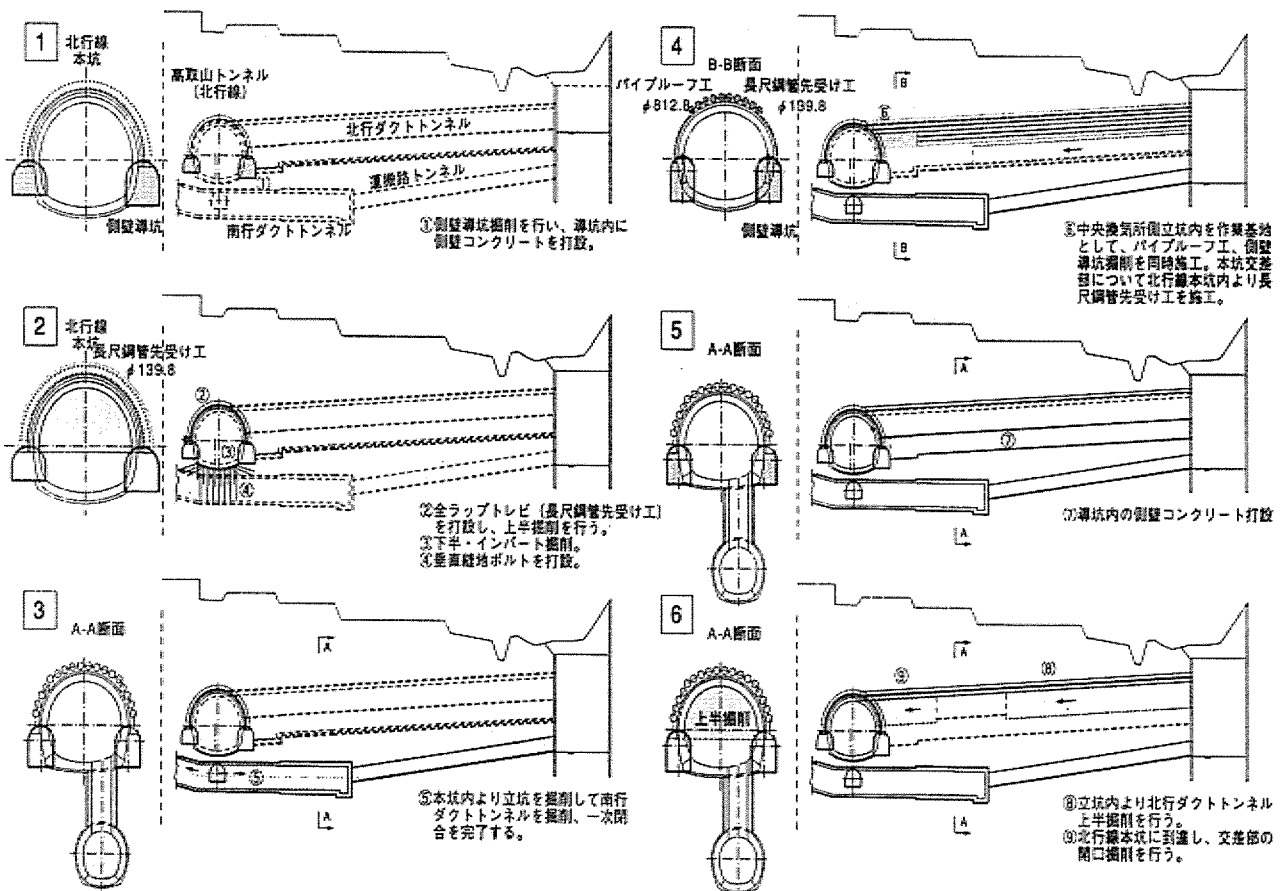


図-3-8 差部開口手順図

分的に打設をおこなった上、北行ダクトトンネルを先に掘削して、開口に先行し開口部天端にパイプルーフと吹付コンクリートにより一次支保によるシェルを構築した(図-3-8, 写真-3-1, 3-2)。



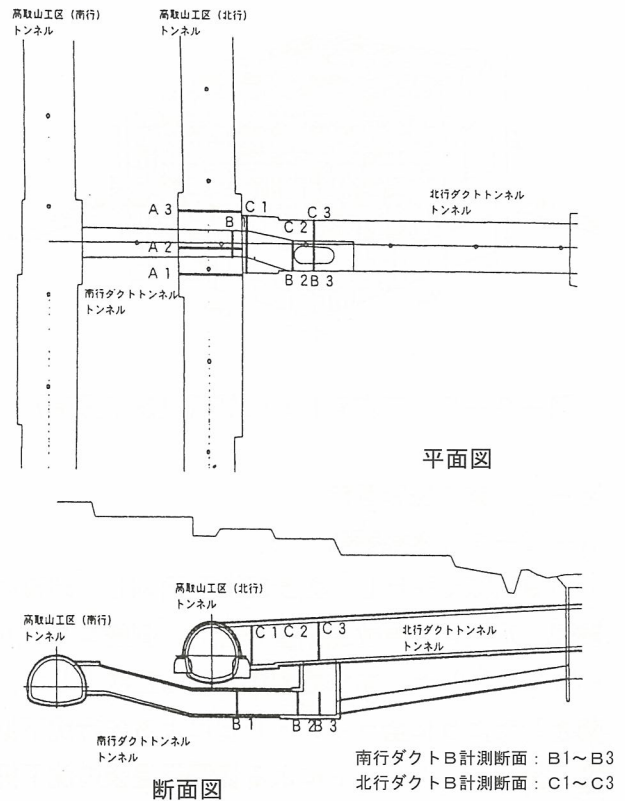
写真-3-1 交差部開口状況 (ダクト側より)



写真-3-2 交差部開口状況 (本坑側より)

4. 交差部施工時の挙動

交差部施工にあたっては、各施工ステップにおけるトンネル構造の安定性を確認する目的で計測断面を配置した(図-4-1)。交差部開口に伴う計測管理体制を図-4-2に示す。各施工ステップの各断面における挙動は、表-4-1にまとめる。



計測断面と計測項目

	A断面	B断面	C断面
天端沈下	○	○	○
内空変位	○	○	○
鋼製支保工応力	○	○	○
吹付コンクリート応力	○	○	○
仮巻コンクリート応力	○		

図-4-1 計測断面

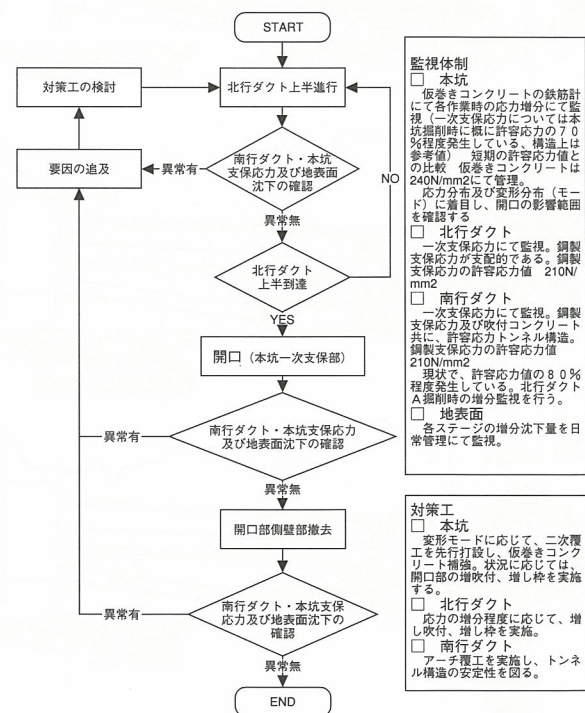


図-4-2 交差部開口計測管理体制

表-4-1 計測系結果一覧

施工ステップ 計測断面	本坑掘削時	南行ダクト掘削時	北行ダクト掘削時	交差部開口時
本坑部 (A計測断面)	先行沈下量：10～15 mm 切羽通過後沈下量：5から10 mm 地表面沈下量：坑内沈下量の50% 標準部に比べ50%に抑制された 一次支保脚部荷重：180～200 t / m (鋼製支保工の荷重負担が大きい) ・全土被り荷重のおよそ70% ・ほぼ解析時に想定された緩み高さ 相当の荷重が作用した	天端沈下：3～4 mm増分 内空変位：変化無し 地表面沈下量：坑内沈下量の100% 一次支保脚部荷重：50 t / m除荷 ・側壁コンクリートに下側引張、 上側圧縮の曲げ挙動が発生	天端沈下：変化無し 内空変位：変化無し 地表面沈下量：変化無し 一次支保脚部荷重：変化無し	天端沈下：4 mm増分 内空変位：変化無し 地表面沈下量：4 mm増分 一次支保脚部荷重： A 1 断面：40 t / m増 (肩部～脚部) A 2 断面：130 t / m増 (肩部) A 3 断面：60 t / m増 (肩部～脚部) ・開口部の反対側まで影響は及ばず ・トンネル軸線方向についても影響 範囲は小さい (2～3m)
南行ダクト (B計測断面)		天端沈下：5 mm 内空変位：5 mm 地表面沈下量：有意な変化無し 一次支保脚部荷重：80 t / m	天端沈下：変化無し 内空変位：変化無し 地表面沈下量：変化無し 一次支保脚部荷重：40 t / m除荷 ・天端部に比べ肩～脚部付近で除荷 の傾向強し	天端沈下：変化無し 内空変位：変化無し 地表面沈下量：変化無し 一次支保脚部荷重：変化無し
北行ダクト (C計測断面)			先行沈下量：5～10 mm 切羽通過後沈下量：5 mm 地表面沈下量：坑内沈下量の70% 一次支保脚部荷重：100 t / m ・全土被り荷重のおよそ50%	天端沈下：若干増加傾向にあるが 有意な変化無し 内空変位：変化無し 地表面沈下量：変化無し 一次支保脚部荷重：変化無し

4-1 本線通過時

標準部と比べ、地表面に対する影響の抑制効果の確認を行った。サイロット工法を採用することによって、天端沈下、内空変位ともに5～10mm程度と極端に小さくなった(図-4-3)。切羽1掘進当りの天端沈下量(鋼管沈下量)の増分は小さく(図-4-4)、先行変位量も概ね標準部の半分の10～15mm程度となった。トレビの全ラップおよび

サイロット工法が、地表面沈下抑制に対して極めて効果的である結果となった。

4-2 南行ダクトトンネル掘削時

南行ダクトトンネルが本坑側壁直下を通り抜けた段階で本坑にて5 mmの増分沈下が発生した。これは、本坑支保工に作用している荷重に対して側壁コンクリートが梁として作用した場合に、発生するたわみ量にほぼ符合している。

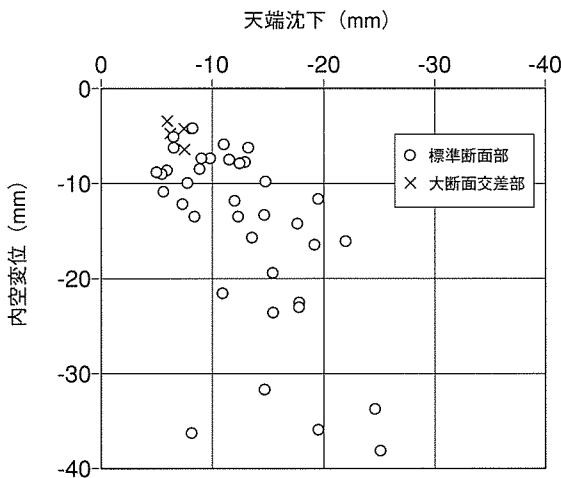


図-4-3 A計測結果(交差部断面)

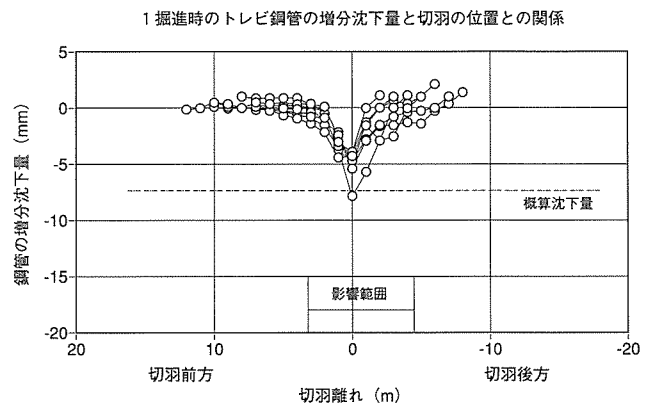


図-4-4 1掘進当りの鋼管増分沈下量(全ラップ)の効果

4-3 北行ダクトトンネル掘削時

北行ダクトトンネルの掘削による影響が、南行ダクトトンネルに及ぼす影響を懸念していたが、結果的には有意な影響は認められなかった。また、本坑に対する影響についても、北行ダクトトンネル掘削に対する有意な影響は認められなかった。これは、上半掘削に先行して、パイプルーフトと側壁コンクリートの補助工法を採用したことによって、周辺に与える影響を極力抑制できた結果と考えられる。

4-4 交差部開口時

交差部開口時には、解析等にて予想されたとおり、開口中央部（A2計測断面）にて除荷、両脇

部（A1、A3計測断面部）で荷重増加の傾向にあることがわかる（図-4-5）。荷重の増加範囲についても、開口反対側まで及んでいないこと、本坑トンネル軸線方向についてもその影響範囲が2～3m程度で抑止できていることから、剛性の高い仮巻きコンクリート及び二次覆工で開口部の荷重をスムーズに受け替えられた傾向にあることがうかがえる。

5. まとめ

今回得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 土被りの浅い脆弱な地山における都市トンネルを施工する上で、先行沈下抑制を目的

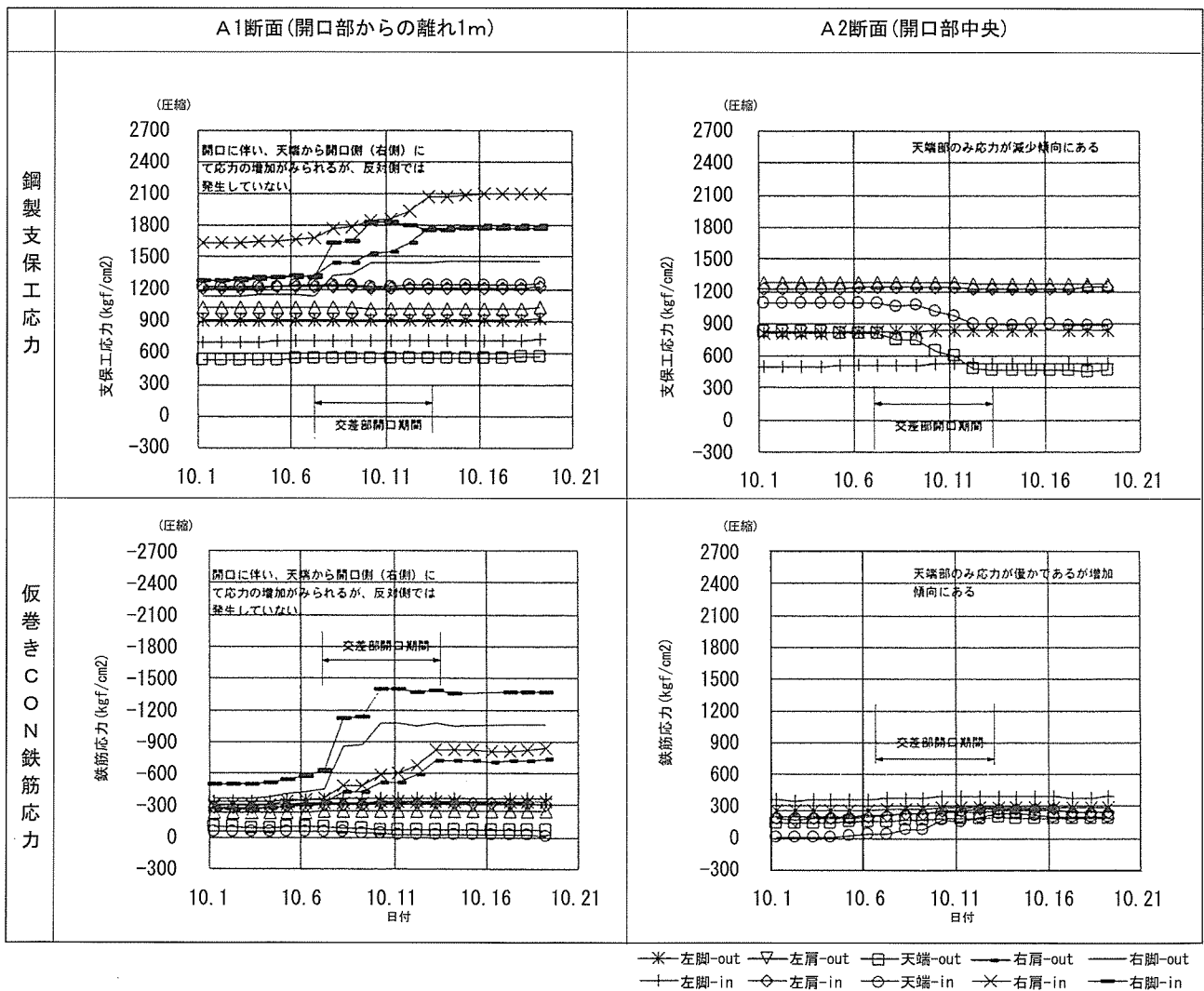


図-4-5 開口時支保応力の経時変化図

に採用した全ラップトレビ工法と切羽通過後沈下抑制のためのサイロット工法は効果的であった。今後、対応する地山等、制約条件は存在するものの同種の工事の参考になると考えられる。

- (2) 開口に先だって、本坑側に打設を行った仮巻きコンクリートは、沈下抑制上あるいはトンネル構造安定性を図る上でも効果的であった。
- (3) 交差部におけるトンネル挙動は、事前に実施した解析とよく符合した挙動を示しており、北行ダクトトンネルの掘削及び交差部開口に伴い地山の緩みを助長させずに施工できたことがうかがえる。また、今回用いた設計-施工のアプローチを今後も有効に展開できると考えられる。

6. おわりに

今後とも都市部において山岳工法が採用されるケースが増加すると思われるなか、より一層の計測データの蓄積と解析を行い、長尺鋼管先受け工法等の補助工法による沈下抑制に関する設計-施工法を確立することが肝要と思われる。今回得られた知見が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 瀬戸口, 明神, 白川, 青木, 小原: 住宅密集地下における大断面交差部の設計と計測, トンネル工学研究論文・報告集第11巻, 2001.
- 2) 瀧治雄, 岩野政浩: 長尺先受け工の設計手法に関する提案とその変位抑制効果について, トンネル工学研究論文・報告集、第8巻, 1998.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF LARGE TUNNEL INTERSECTION BENEATH DENSELY POPULATED AREA

Hiroshi SEKIMOTO, Masaaki MYOUJIN, Hiroshi TAKAHASHI

The Takatoriyama tunnel has a 2-lane cross section and is divided between 511m of mountain area and 732m of urban area. In the urban part, there is a large intersection where the main tunnel (170 m²), meets a ventilation duct tunnel (110 m²). Construction works were successfully carried out based on the observational construction method and 3-dimensional analysis. The umbrella method of injecting a long steel pipe around the top heading of the tunnel before cutting and the side drift tunneling method were adopted. In this paper, the authors discuss the design methodology they adapted to the large intersection and evaluate its effectiveness.