

住宅密集地における 大断面浅層 4 連めがねトンネルの計測管理

Measurement in Large Double Adjoined Binocular Tunnels
at Densely Residential Area

田口敬介¹・水野希典¹・足達康軌²・大島基義³・小池真史⁴

Keisuke Taguchi, Maresuke Mizuno, Yasuki Adachi,
Motoyoshi Oshima and Masashi Koike

¹西日本高速道路株式会社 関西支社 枚方工事事務所 (〒573-0023 大阪府枚方市東田宮2-6-1)

²正会員 大成建設(株)・(株)間組・(株)福田組 小路トンネル工事特定建設工事共同企業体
(〒572-0840 大阪府寝屋川市太秦桜が丘34-14)

³正会員 工修 大成建設(株)・(株)間組・(株)福田組 小路トンネル工事特定建設工事共同企業体
E-mail:m-oshima@ce.taisei.co.jp

⁴正会員 工修 大成建設株式会社 本社技術センター 土木技術研究所地盤岩盤研究室
(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

Large double adjoined binocular tunnels, which consist of four-linked tunnel system, are implemented in shallow and soft ground at densely residential area. From a view point of efficiency and safety, the tunnels are planned to be constructed by NATM Method using machine excavation in combination with auxiliary methods such as diaphragm wall, soil improvement, AGF method and so on. The soil improvement of surrounding soft ground is adopted to improve the stability of the center pillar and the tunnel face in advance to the tunnel excavation. Diaphragm wall is also constructed to minimize the influence to the outer residential area.

This paper describes the construction condition and the measurement results during tunnel excavation, focusing on the auxiliary methods to reduce the ground surface settlement.

Key Words : double adjoined binocular tunnels, auxiliary methods, center pillar,
field measurement, 3D analysis

1. はじめに

第二京阪道路は併設する大阪北道路とともに一般国道1号のバイパスとして京都・大阪間を連結し、現道の交通混雑を緩和すると同時に近畿地方の広域幹線道路網の一端を担う道路である。小路トンネル(仮称)は、人家が密集する丘陵部に位置し、浅層部を NATM 工法で施工する浅層大断面4連めがねトンネルという、全国的にも例を見ない工法を採用している。トンネル両側には民家が密集しているうえ、土かぶりが最大で約10.5mと非常に小さいため、適切な施工方法、補助工法を選定し、計測管理を行いながら周辺環境への影響(地表面沈下等)を最小限に抑制する必要がある。本稿では地表面沈下を抑

制するために採用した補助工法に着目し、トンネル掘削時の施工状況および計測結果について述べる。

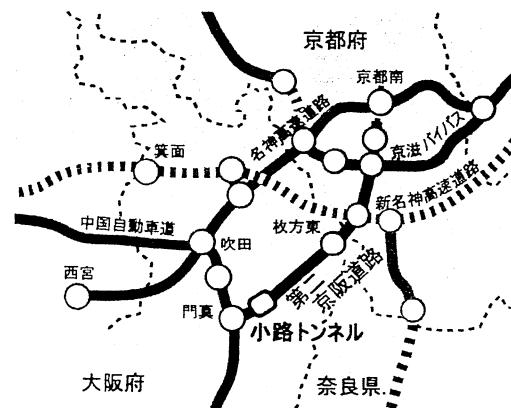


図-1 近畿地方の広域幹線網およびトンネル位置図

2. 工事概要

(1) 工事概要

工事名称：第二京阪道路 小路トンネル工事
施工場所：大阪府寝屋川市
工 期：平成 15 年 12 月 26 日～
平成 20 年 8 月 20 日（その 1 工事）
平成 20 年 7 月 8 日～
平成 22 年 3 月 29 日（その 2 工事）
発 注 者：西日本高速道路㈱ 関西支社
施 工 者：大成建設㈱・㈱間組・㈱福田組
特定建設工事共同企業体
主要工事数量を表-1 に示す。

表-1 主要工事数量表

項 目	仕 様	数 量
地中連続壁工	TRD工法(t=550mm)	21,060 m ²
地盤改良工	深層混合改良	約 5,400 本
導 坑 掘 削	機械掘削(全断面掘削)	265m×3本
センターピラー	補強鋼材 H200,H250@1.0m	1,325 t
	コンクリート 30-15-15N	11,055 m ³
本坑掘削	一般部 機械掘削	265m×2本
	専用部 (ベンチカット工法)	265m×2本
二次覆工	鉄 筋 SD345	2,240 t
	コンクリート 30-8-40BB (インバート)	13,689 m ³
	30-50-25N (アーチ覆工)	13,133 m ³

(2) トンネル概要

本トンネルは図-2 に示すように 4 本のトンネル（中央 2 本：3 車線自動車専用道路，外側 2 本：1 車線一般国道）が横並びとなった全幅約 58m の 4 連めがね構造となっている。未固結大阪層群での施工となり支持力不足が懸念されるため，3 本導坑方式が採用されており，導坑内に構築するセンターピラーは防水性を考慮し，二次覆工との分離構造が採用

されている。また二次覆工は動的解析による耐震設計を実施した RC 構造となっている。トンネル仕様を表-2 に示す。

表-2 トンネル仕様一覧

項 目	専 用 部	一 般 部
掘 削 断 面 積	約 170 m ²	約 84 m ²
内 空 断 面 積	約 128 m ²	約 61 m ²
一次支保	鋼製支保工 HH200@1.0m	H150(HH150)@1.0m
	吹付け コンクリート ($f'_{ck}=36\text{N/mm}^2$)	t=200mm ($f'_{ck}=18\text{N/mm}^2$)
二次覆工	インバート ($f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$)	t=1,000mm ($f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$)
	アーチ覆工 ($f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$)	t=400mm ($f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$)

(3) 地質概要

当該工事場所は枚方丘陵の南西部に位置し，枚方丘陵は大阪層群とそれを覆う尾根部段丘層および谷底低地の沖積層により構成されている。大阪層群は粘性土層（Oc），砂質土層（Os），礫質土層（Og）がほぼ水平に堆積しており，トンネル掘削個所の大部分は地下水（第 2 帯水層）を有する未固結砂質土層で，トンネル底盤付近には全線に渡り粘性土層が分布している。また，トンネル区間の大阪側，京都側には旧谷筋が存在し，そこには N 値が 5 以下の軟弱粘土層の分布が確認されている。

(4) 地下水および変位抑制対策

トンネル掘削個所は地下水を有する未固結砂層のため，トンネル両側に地中連続壁（t=550mm）を構築し，トンネル掘削部への地下水流入を防止している。また，地中連続壁には芯材（H400×200@1.0m）を配置し，トンネル掘削による民地部の変位抑制を図っている。

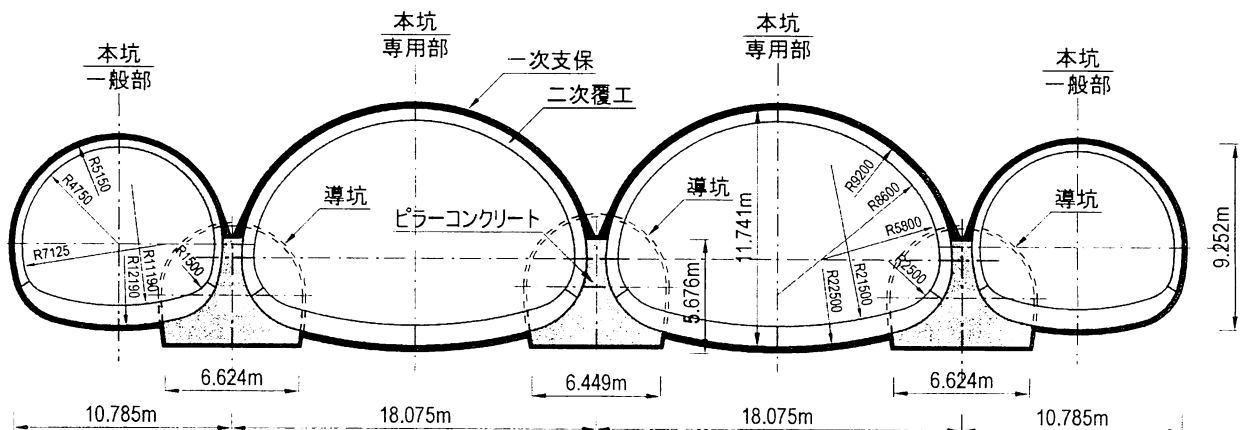


図-2 小路トンネル標準断面図

(5) 支持力対策

トンネル全線に渡りトンネル底盤付近には粘土層が分布しており、ピラーに全土かぶり荷重が作用した場合には支持力不足が生じると考えられる。そこで、導坑幅+片側1列は地盤改良（深層混合改良：改良強度 1.0～1.2MPa）により支持地盤まで改良し、支持力を確保している。

(6) 切羽安定対策

導坑部には支持力対策としての地盤改良が施されているが、トンネル中央部には未固結砂質土層が残るため、地質条件、土かぶり厚、トンネル上部の利用形態等に応じて各トンネルを図-3 に示すような3つの区間に区分し、切羽安定対策として①地盤改良工法、②薬液注入工法、③AGF+鏡ボルト工法を使い分けた。

a) 地盤改良区間

土かぶりが 0.5D 以下および軟弱粘土層がトンネル断面内に分布する範囲においては、経済性に優れ、軟弱粘土層を確実に改良可能な地盤改良工（支持力対策と同様の深層混合改良）を採用した。改良深度は天端防護と鏡補強兼用とするため SL+2m までとし、改良強度はFEM解析結果にもとづき 1.0MPa に設定した。

b) 薬液注入区間

比較的土かぶりが大きい（0.5D 以上）区間には地盤改良工より経済性に優れる薬液注入工法を採用した。注入材としては、砂質土地盤への浸透性に優れ、地下水汚染等環境への影響がない水ガラス系溶液型の注入材を選定した。薬液注入に期待する効果としては、アーチ部ではトンネル外周にグラウンドアーチを形成して鉛直荷重を直接支持する目的であるのに対し、掘削を行う鏡面に関しては緩みおよび肌落ちの防止が主目的となるためある程度の粘着力向上が期待できればよい。そこで注入範囲をトンネル外周 2m 範囲のアーチ部（ハードゾーン）と鏡面（ソフトゾーン）に区分し、ハードゾーンは地盤の空隙率に注入充填率を乗じた注入率とし、ソフトゾーンはハードゾーンの 70%の注入率とした。

c) AGF工法+鏡ボルト区間

薬液注入工法はトンネル掘削に先立ち天端・鏡補強が可能で、上半掘削を連続して行えるため工程的には有利であるが、トンネル補助工法としては実績が少なく、粘性土層に対する注入効果に懸念が残る。そこでトンネル直上に軟弱粘土層が分布する範囲および生活道路が横断する範囲に関してはトンネル補助工法として実績が多く、安定した効果が期待できる AGF 工法+鏡ボルトを採用した（以降 AGF 区間と称す）。

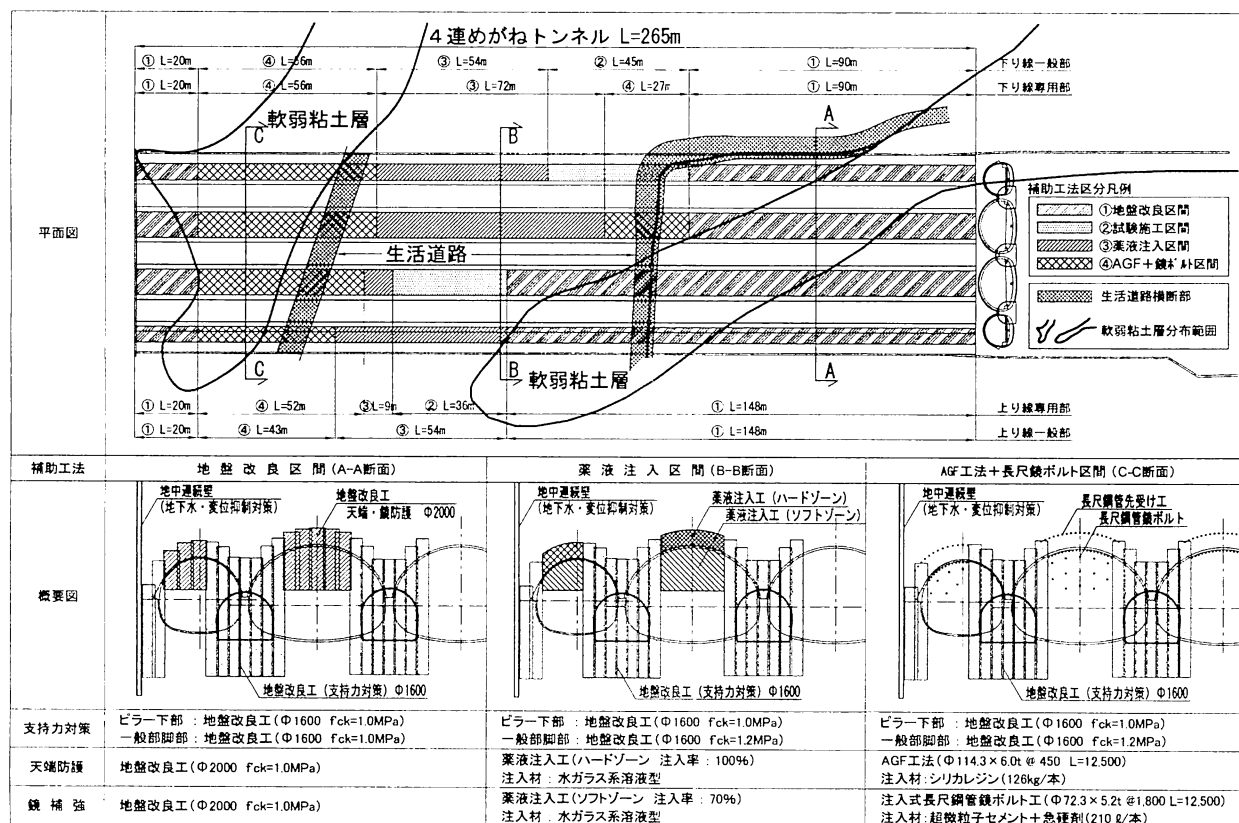


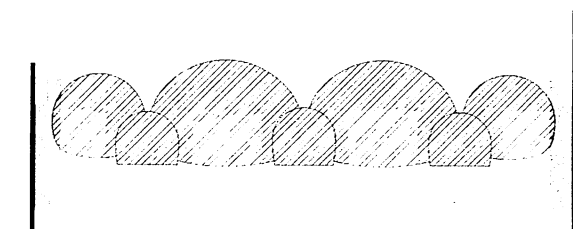
図-3 トンネル補助工法区分図

(7) 施工手順

本トンネルの施工手順図を図-4に示す。

地中連続壁工および地盤改良工が完了後、まず3本の導坑を並行して掘削し、掘削完了後、導坑内にピラーコンクリートを打設する。次に、4本の本坑の内、隣り合わない2本のトンネル（先進坑）の掘削を同時に開始し、上半切羽が150m程度進んだ段階で残り2本のトンネル（後進坑）の掘削を開始する。また、覆工コンクリートについては、後進坑掘削の影響が無くなった時点で先進坑から打設を開始する。

①地中連続壁工および地盤改良工



②導坑掘削



③ピラーコンクリート打設



④先進坑掘削



⑤後進坑掘削



⑥覆工コンクリート打設

図-4 トンネル施工手順図

4. 施工時の状況

(1) 地盤改良区間

地盤改良はスラリー状の固化材を原位置に吐出しながら原位置土と固化材を機械的に強制混合攪拌し、

所定の深度まで削孔したのち混合攪拌装置を引き抜きつつ、再度土と固化材を攪拌することによって地盤改良体を造成する工法を採用した。改良率は90.6%（三角形接円配置）とし、改良径は施工深度により $\phi 1\,600$ （支持力対策部）と $\phi 2\,000$ （天端、鏡防護部）を使い分けた。支持力対策部は作用荷重を確実に支持層に伝達できるよう、積算電流値と貫入速度で着底管理を行い、改良体強度はコアサンプリングによる一軸圧縮強度試験および原位置における平板載荷試験により確認した。支持力対策部の改良体造成状況を写真-1に示すが、施工深度が20mを超えるピラー下部においても良好な精度が確保されていた。強度も設計1.0MPaに対して3.0MPa程度発現しており、室内配合試験における安全率2.5がそのまま原位置でも確保されている状態であった。

地盤改良区間の切羽状況を写真-2に示すが、天端、鏡面ともに安定性は非常に良好で、地表面沈下もトンネル直上で10mm程度ととくに問題なく掘削可能であった。

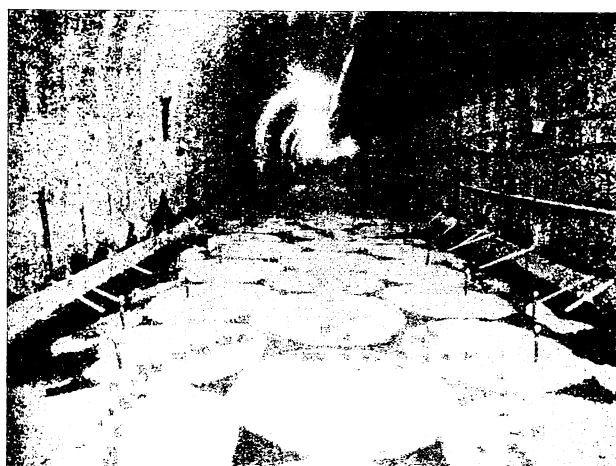


写真-1 支持力対策部の改良体造成状況



写真-2 地盤改良区間切羽状況

(2) 薬液注入区間

薬液注入区間の注入方式は瞬結材（一次注入材）によるパッカー効果と緩結材（二次注入材）による浸透効果が図れ、かつ削孔、注入が1工程で行える「二重管ストレーナ複相式」を採用した。施工機械には小型ボーリングマシンを8セット用い、水平に堆積した砂質土層に対し薬液浸透性の向上が期待できる多方向噴射式特殊先端モータを採用することで、計画注入量のほぼ全量を注入することができた。

掘削初期段階において指示薬による注入確認を行ったところ薬液の浸透状況は良好で、注入材の効果による粘着力の増加および内圧効果により切羽の自立性も良く、吹付けコンクリートの付着も良好であった。

(3) AGF区間

鏡ボルトのボルト材としてはスリット個所で容易に切断可能で、撤去鋼管の分別が容易なスリット入り鋼管タイプを使用し、注入材には砂質土地盤に対する浸透性に優れ、鋼管周辺地山への浸透注入効果が期待できる超微粒子セメント+急硬剤を選定した。鏡ボルトの打設本数に関しては、AGF区間の掘削初期段階で打設間隔を1.2m、1.5m、1.8mと順次落としていく試験施工（図-3 試験施工区間）を実施した結果、1.8m間隔でも十分な効果が認められたため、1.8m間隔で鏡ボルトの打設を行うものとした。

切羽状況を写真-3に示す。掘削時の状況としては、鏡ボルトの注入量をボアホールの3倍と設定していたが、懸濁型の注入材では注入圧の上昇や鏡面からのリークにより設計注入量の70%程度しか注入することができず、鋼管周辺のみの充填注入となっていた。そのため、掘削時に若干の肌落ち、小崩壊が発生したが、AGFおよび鏡ボルトの効果で大規模な崩壊等が発生することなく掘削が可能であった。

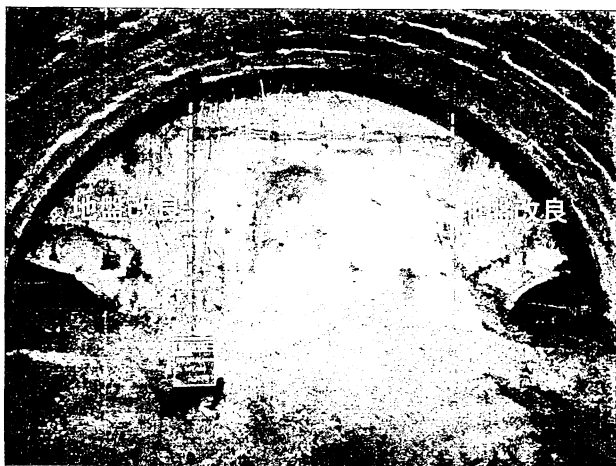


写真-3 AGF区間切羽状況

5. 本坑掘削時の計測管理

(1) 計測項目

本工事で行った計測項目の一覧を表-3に示す。本トンネルでは上半支保工を支持するセンターピラーが重要な役割を果たすため、通常のA計測、B計測に加え、センターピラーの計測を追加している。

表-3 計測項目一覧

計測項目		計測器
計測工 A	天端沈下・内空変位	三次元測量器
	地表面沈下測定A	レベル
	ビラー部沈下測定	三次元測量器
計測工 B	吹付けコンクリート応力測定	コンクリート有効応力計
	鋼アーチ支保工応力測定	ひずみ計
	地表面沈下測定B	GPS
	TRDの水平変位測定	多段式傾斜計
	TRDの芯材応力測定	ひずみ計
計測工 C	ビラーH鋼の応力測定	ひずみ計
	ビラーコンクリート応力測定	コンクリート有効応力計
	ビラー傾斜測定	据置型傾斜計
	ビラー支持地盤応力測定	ひずみ計

(2) 管理基準値の設定

本トンネルは、土被りも小さく、トンネルの近傍に民家が位置するという厳しい条件下での施工となるため、掘削に伴う地盤の安定性やトンネルの変形挙動を事前に把握し、適切な管理基準値を設定した上で施工管理にあたる必要があると考えられた。そこで、三次元的な地形、地質構造を再現した解析モデルを作成し、上下半切羽の離れや先進坑切羽と後進坑切羽の離れなど、四本のトンネルの掘削手順も忠実に再現した三次元掘削解析を実施し、この解析結果をもとに、施工時に必要とされる管理基準値を設定した。なお、各計測項目に対して管理基準値を設定したが、本坑施工中における管理レベルの判定はそれぞれの計測結果単独で行うのではなく、地表面沈下やトンネル天端沈下を主として総合的に管理レベルを評価することとした。

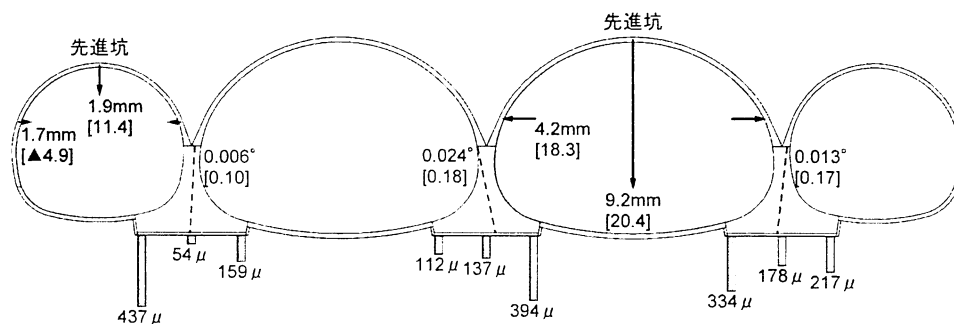
(3) 計測結果

a) 地表面変位

地盤改良区間およびAGF区間の地表面沈下分布図を図-5に示す。両者ともに先進坑掘削時は先進坑専用部直上の沈下量が大きくなり、後進坑掘削時は後進坑直上の沈下は増大するが、掘削が完了している先進坑直上はほとんど沈下しない傾向がある。その結果、先進坑直上の沈下量と、後進坑直上の沈下

実際の沈下量と予測解析結果を比較すると、予測解析よりかなり小さな沈下量であったが、これは実際の地盤改良の強度（変形係数）が設計値を大きく上回っている（3 倍程度）ことが主要因であると考えられ、最終的には地盤改良区間で 11mm、AGF 区間で 15mm と小さな変位（管理レベル I 以下）で掘削を完了することができた。また、地中連続壁を境にして地表面沈下が小さくなることから、トンネル掘削に伴う影響が周辺民地部におよぶのを地中連続壁が遮断する効果も確認できた。

【先進坑掘削時】



【後進坑掘削時】

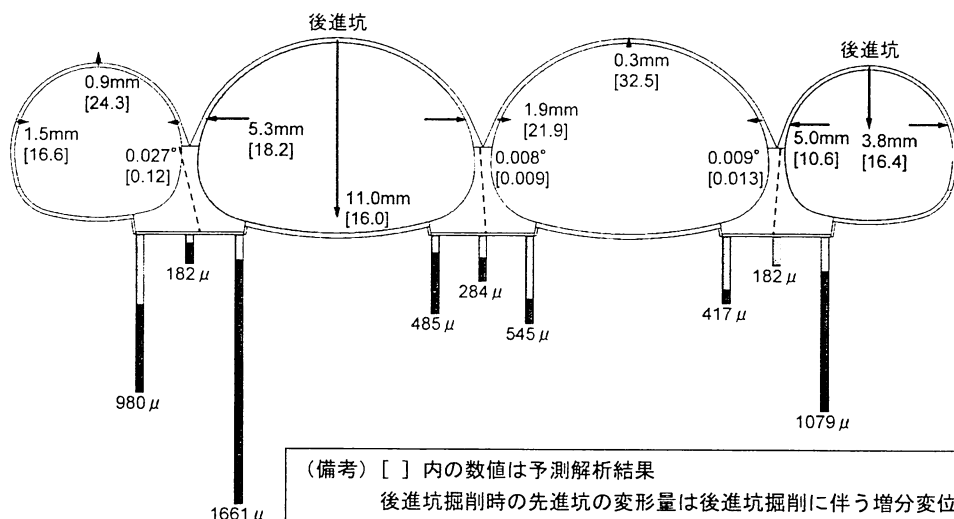


図-6 AGF 区間の支保変形図およびピラー下部地盤改良体の鉛直ひずみ

c) 支保の変形挙動（後進坑掘削時）

後進坑掘削時の変形モードは先進坑掘削時と同様の傾向を示しているが、変形量、ピラー傾斜ともに先進坑掘削時より大きくなっている。一方、先進坑は、後進坑掘削に伴い内空が縮小し、若干ではあるが天端が隆起している。

また、改良体鉛直ひずみも先進坑と同様、後進坑内側のひずみが増加しているが、後進坑掘削完了時における全ひずみは、先進坑掘削完了時のひずみよりも全体で2倍以上大きくなっており、後進坑の掘削に伴ってピラーに作用する土荷重が急激に大きくなったと想定される。これは後進坑を掘削することにより先進坑周辺地山のアーチ効果が低下したためであると考えられる。

d) ピラー一部の支保応力

地盤改良区間におけるピラー部の支保応力を図-7に示す。先進坑掘削時の支保応力は掘削したトンネル側の圧縮応力度が大きくなり、トンネルから離れるに従い圧縮応力度は小さくなっている。その結果、鋼製支保工には引張応力が発生している個所もある。この傾向は予測解析でも概ね再現できている。一方、

後進坑掘削時にはすべての支保応力がほぼ均等に圧縮側に増大する傾向が見られ、後進坑側の応力が増大する予測解析結果とは応力分布勾配が異なる。

次に、実際にピラーがどの程度の荷重を負担しているかを以下の3種類の荷重により比較検討した。

①推定荷重：図-8より算出した全土被り相当荷重

②計測荷重：図-7の計測結果より算出される荷重

③解析荷重：図-7の解析結果より算出される荷重

先進坑掘削時には、計測荷重は全土被り相当の推定荷重よりも40%程度小さいことから、アーチ効果が発揮されていると推定される。解析荷重は、計測荷重と推定荷重の間であることから、ある程度のアーチ効果が発揮されている。

一方、後進坑掘削時には、計測荷重が推定荷重に非常に近くなっていることから、支保の変形挙動の項でも述べたが、後進坑掘削時にはアーチ効果は期待できず、全土被り相当の荷重が作用していると考えられる。また、解析荷重は、推定荷重よりも小さいことから、後進坑に伴うアーチ効果の低減は再現できていないと考えられる。

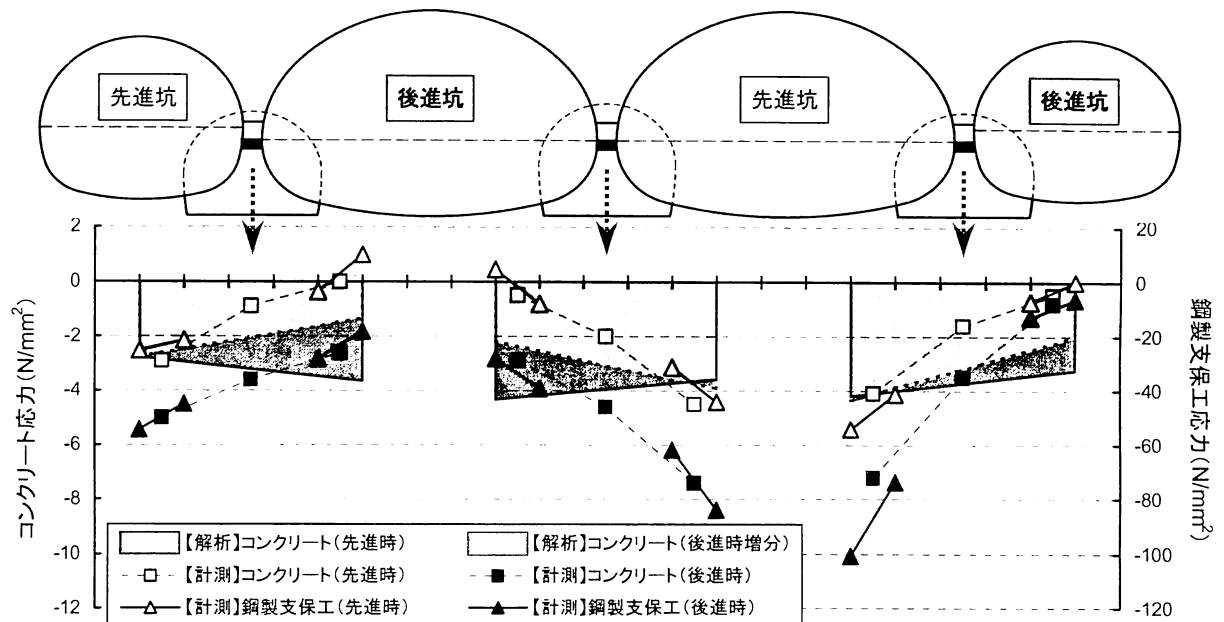
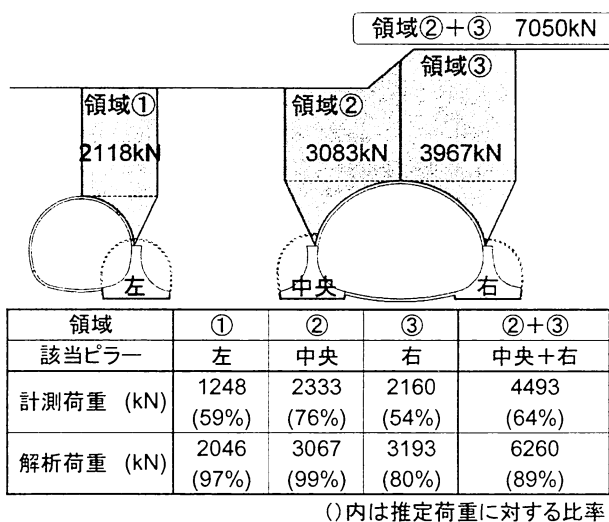


図-7 AGF 区間におけるピラー部の支保応力

5. おわりに

【先進坑掘削時】



【後進坑掘削時】

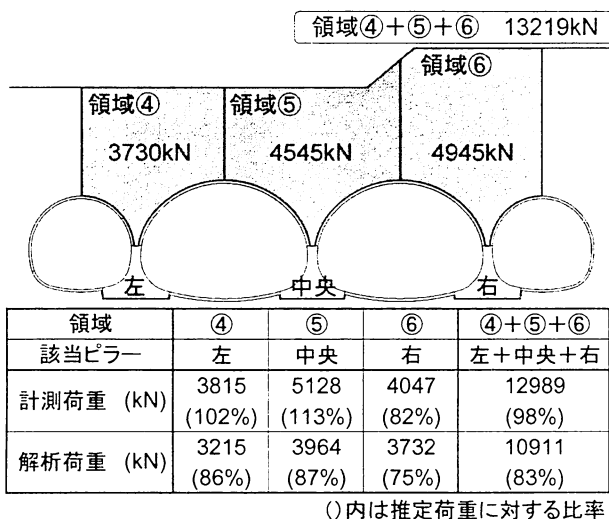


図-8 推定荷重の算出

本工事では平成19年6月より本坑掘削を開始したが、民家が近接し、最大土かぶり10.5mという厳しい条件の中で、地盤改良により支持力を確保し、適切な補助工法を選定することで、大きな変位が生じることもなく平成20年5月に本坑掘削を無事完了することができた。予測解析では先進坑掘削時と比較して後進坑掘削時の再現性が低く、今後のめがねトンネルの予測解析においては後進坑掘削による先進坑周辺地山のアーチ効果低下の再現手法が課題になるのではないかと考えられる。

最後に本工事の設計、施工の面においてご協力いただきました足立委員長はじめ施工検討委員会の委員の方々にはこの場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 森正明, 中野将宏, 大島基義, 小池真史, 松村謙治: 4連めがねトンネルにおけるピラーコンクリート構造の検討, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集 第6部門, pp.281-282, 2007.
- 森正明, 中野将宏, 白川賢志, 大島基義: 人家密集地における大断面浅層4連めがねトンネルの支持力対策, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集 第6部門, pp.349-350, 2006.
- 森正明, 中野将宏, 白川賢志, 大島基義, 小池真史: 住宅密集地における大断面浅層4連めがねトンネルの設計・施工, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.17, pp.187-194, 2007.