

# 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

Large Double Adjoined Binocular Tunnels at Densely Residential Area

森正明<sup>1</sup>・中野将宏<sup>2</sup>・白川賢志<sup>3</sup>・大島基義<sup>4</sup>・小池真史<sup>5</sup>

Masaaki Mori, Masahiro Nakano, Kenji Shirakawa,  
Motoyoshi Oshima and Masashi Koike

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>西日本高速道路株式会社 中国支社 建設事業部 (〒731-0103 広島県広島市安佐南区緑井2-26-1)

<sup>3</sup>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)

<sup>4</sup>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

<sup>5</sup>正会員 工修 大成建設株式会社 土木本部 土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:koike-m@ce.aisei.co.jp

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 and AGF method. First of all, the soil improvement to surrounding soft ground is adopted to support the center pillar and to ensure the stability of the tunnel face in advance. Next, the diaphragm wall is constructed prior to the tunnel excavation not only for the site-work efficiency, but also for the environmental protection.

This paper describes the construction planning and the design for Shoji Tunnel project which has above features.

**Key Words :** large double adjoined binocular tunnels, center pillars, 3D prediction analysis, soft ground

## 1. はじめに

第二京阪道路は、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自動車専用道路である。本報告では、第二京阪道路の寝屋川北IC～寝屋川南IC間の住宅が密集する丘陵部に位置し、浅層部をNATMで施工する大断面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た小路トンネルの設計および施工について述べる。小路トンネルは、図-2に示すように、4本の本坑トンネル(自動車専用道路部:2本,  $A=170\text{m}^2$ , 一般国道部:2本,  $A=85\text{m}^2$ )がそれぞれつながった形状をしている。本坑トンネル間に設置されている3本のセンターピラーは、本坑トンネルの掘削に先立って掘削さ

れる導坑(3本,  $A=40\text{m}^2$ )内部に、SRC構造として構築される。このセンターピラーは、本坑の一次支保のみを支える構造とするために、二次覆工とは分離された構造を採用している。

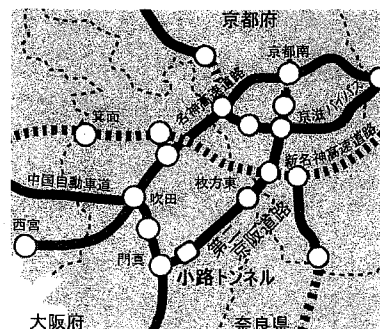


図-1 近畿地方の広域幹線網およびトンネル位置図

## 2. 施工計画

### (1) 工事概要

本トンネルは、粘性土層・砂質土層・砂礫土層が互層状の未固結堆積物からなる大阪層群に位置し、土被りが最大で約10mと小さく、住宅が近接している。このような背景から、出来る限り民地部の沈下を抑制するために、以下の工法を採用してトンネル周辺地山を補強した後、トンネル掘削を実施することとした。

#### ①地中連続壁工

#### ②地盤改良工

#### ③長尺先受け工

図-3は、上記工法の施工位置および範囲を示しており、トンネル全長は大きく3区間に分けられており、発進側から順に、①地盤改良区間、②AGF区間、③開口部山留め対策区間、となっている。

まず、地盤改良区間は、土被りが非常に小さく、かつ、軟弱な沖積土層がトンネル断面内に現れることから、地盤改良の範囲がトンネル上半まで適用されている区間である。次に、AGF区間は、掘削時の天端崩落を防ぐために、地盤改良の代わりに注入式長尺鋼管先受け工が採用されている区間である。最後に、開口部山留め対策区間は、本トンネルが到達する開口部の山留めを補強する目的で、トンネル下端まで地盤改良が適用されている区間である。

### (2) 地中連続壁

地下水位の高い大阪層群での施工となるため、トンネル内に流入する地下水を遮水するとともに、トンネル掘削に伴う地表面沈下の抑制効果を期待して、掘削に先立ち地中連続壁を施工することとした。さらには、トンネル自体が掘削の影響により水平方向

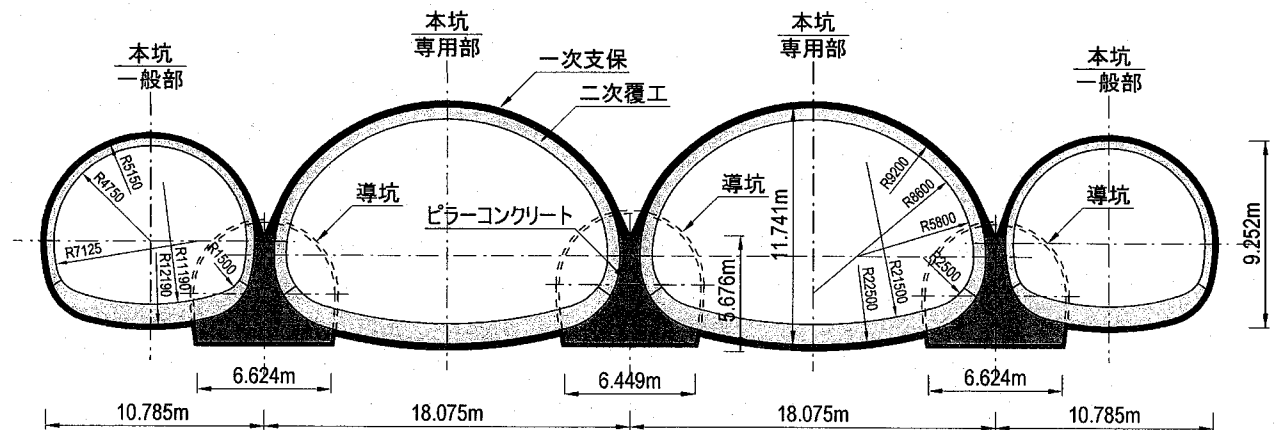


図-2 小路トンネル標準断面図

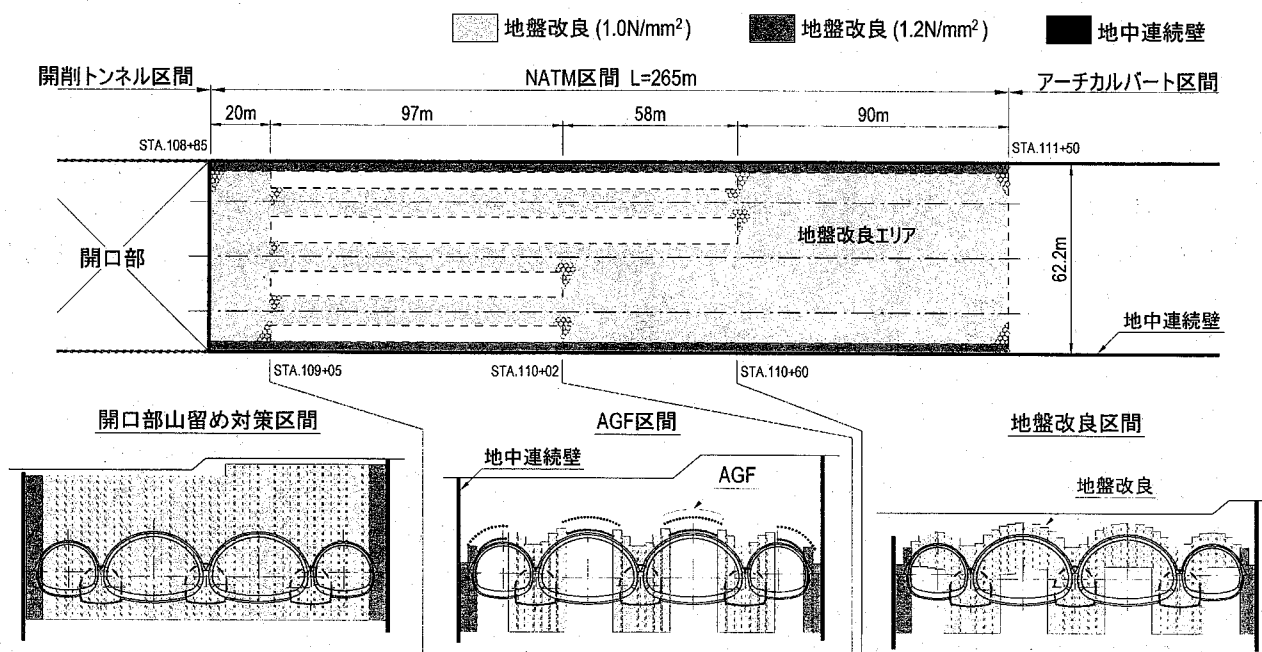


図-3 地表面沈下対策工法施工概要図

に拡がるのを抑制し、トンネル全体の安定性の確保に寄与することを期待している。

図-4は地中連続壁の施工概要を示しており、チェーンソー型のカッターで横方向に地盤を掘削、セメントミルクと原地盤を混合攪拌することで構築する工法を採用した。

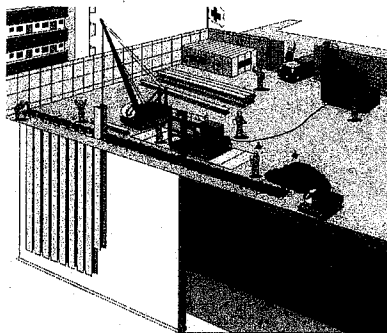


図-4 地中連続壁の概要図

### (3) 地盤改良

以下の内容を主目的として、地表面からの地盤改良を採用した。

- ・トンネル掘削時の切羽安定対策
- ・セクタピラーの支持力確保
- ・二次覆工の長期および地震時安全性の確保

図-3に示すように、土被りや地質状況に応じて、異なる改良範囲を設定している。また、解析等に基づいて、改良体の必要強度を決定している。一方、施工方法に関しては、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。

### (4) 長尺先受け工

地盤改良を実施していない範囲の本坑掘削においては、掘削時の天端崩落防護を目的として、注入式長尺鋼管先受け工を実施することとした。本工法は、現場で通常使用されているドリルジャンボにて鋼管打設と注入により、トンネル前方に約12mの先受けを施工できるという特長を有している。

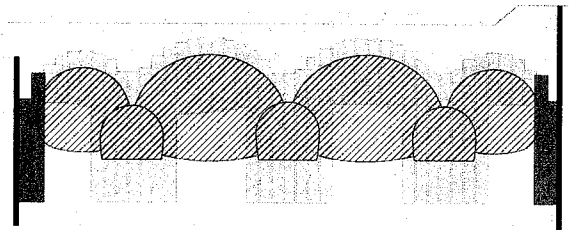
### (5) 施工手順

地盤改良区間における施工手順は以下のとおりである。

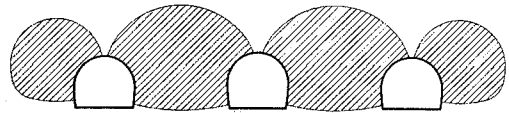
地中連続壁工および地盤改良工の完了後、まず3本の導坑を並行して掘削し、掘削完了後、導坑内にピラーコンクリートを打設する。次に、4本の本坑の内、隣り合わない2本のトンネル（先進坑）の掘削を

同時に開始し、切羽が150m掘削した時点で残り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打設する。

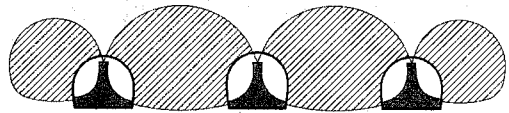
### ①地中連続壁工および地盤改良工



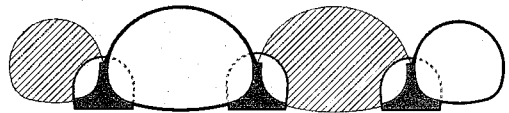
### ②導坑掘削



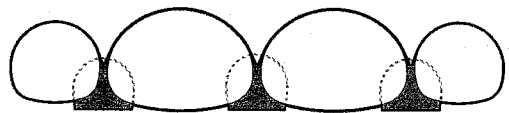
### ③ピラーコンクリート打設



### ④先進坑掘削



### ⑤後進坑掘削



### ⑥覆工コンクリート打設



## 3. トンネルの設計および予測解析

### (1) 概要

一般に、トンネル掘削を実施するためには、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、施工管理にあたる必要がある。また、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、トンネルの変形挙動等を正確に予測す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、前述の施工手順を忠実に再現した三次元掘削解析を実施した。また、先進坑および後進坑掘削に関しては、上下半切羽の離れや後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ている。

このような三次元解析結果をもとに、施工時に必要とされる以下の管理基準値を設定することとした。

a) 民地部変形量

本工事において重要な管理項目である。予測解析値と周辺民地に対する許容値を比較することで、管理基準値の設定を行う。

b) トンネル直上部地表面沈下量及びトンネル変形量

本変形量は、民地部変形量と強い相関関係があると考えられるため、予測解析から求められる相関関係を利用して管理基準値の設定を行う。

c) ピラーコンクリート変位量

ピラーコンクリートは、地表面沈下の抑制やトンネ

ル全体の安定性に対して非常に重要な役割を果たすと考えられる。そこで、ピラーの変位傾向や変位量を解析的に予測し、この予測値をもとに施工時には管理することとする。

(2) 三次元掘削解析

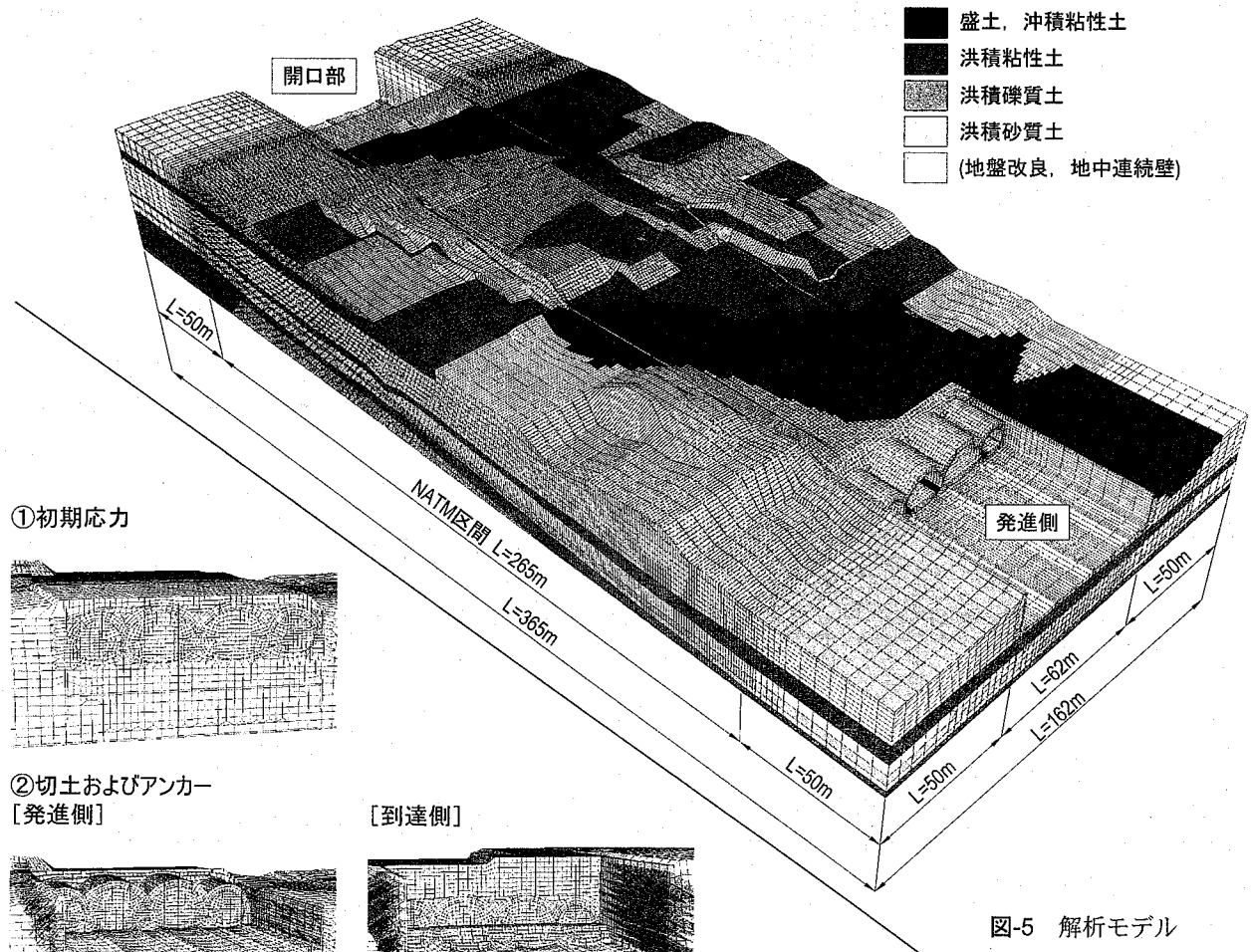
以下に示す条件で、三次元掘削解析を行う。

a) 解析コード

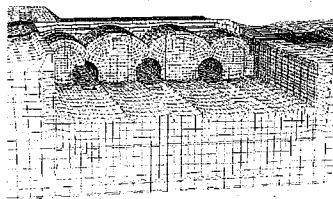
FLAC3D version2.1 (有限差分法)

b) 三次元解析モデル

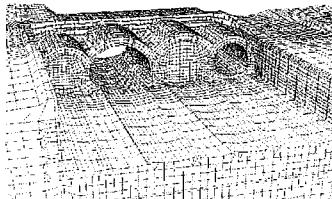
図-5に三次元解析モデル図を示す。地形、地層条件及びトンネルの構造条件を考慮した三次元モデル



③導坑掘削



④先進坑掘削



⑤後進坑掘削

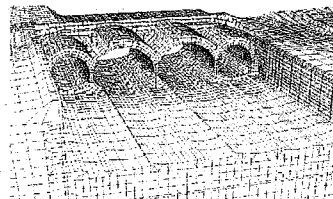


図-6 解析ステップ

を作成する。モデル化においては、ボーリング調査結果 (n=12) をもとに、地表面形状、地層境界面、軟弱層 (沖積粘性土) の分布等の三次元地質構造を忠実に反映し、また、トンネル、地中連続壁および地盤改良の位置関係を三次元的に組み込んだ。

#### c) 地山モデル

地山はソリッド要素を用い、Mohr-Coulomb型の完全弾塑性モデルとした。各層における地盤の物性値は地質調査結果により設定した。

#### d) 支保モデル

地中連続壁工は、ソイルセメントと芯材の曲げ剛性及び軸剛性の特徴を考慮し、それらを合成したソリッド要素としてモデル化することとした。

導坑の支保部材は、吹付けコンクリートと鋼製支保工の曲げ剛性及び軸剛性の特徴を考慮したシェル要素とした。曲げ剛性は、コンクリートの曲げ剛性を無視して、鋼製支保工の曲げ剛性と等価になるものとした。一方、軸剛性は、吹付けコンクリートの軸剛性と鋼製支保工の軸剛性を足し合わせた。

専用部および一般部の支保部材は、吹付けコンクリートと鋼製支保工で構成され、吹付けコンクリートはソリッド要素、鋼製支保工はビーム要素でモデル化した。

#### (3) 解析ステップ

図-6に解析ステップ図を示す。

#### (4) 地表面沈下分布

図-7に掘削完了時の沈下分布図を示す。トンネル直上の地表面沈下量は、地盤改良区間では約20mm、AGF工法区間では約45mmとなっている。一方、施工管理上重要な民地境界部の沈下量は、地盤改良区間では3mm程度、AGF工法区間では5mmとなっている。これらの予測値を元に、施工時の管理を行っている。

#### (5) センターピラーの挙動と構造

図-8に中央部の先進坑到達時のセンターピラーの変形図を示す。先進坑の掘削に伴って、センターピ

表-1 地盤の解析用物性値

| 地 層 名 |     | 記号  | 代表N値 | 単体重量<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | 変形係数<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | ポアソン比 | 粘着力<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 内部摩擦角<br>( $^\circ$ ) |
|-------|-----|-----|------|-----------------------------|-----------------------------|-------|----------------------------|-----------------------|
| 段丘層   | 礫質土 | Dg  | 17   | 19.5                        | 11,900                      | 0.3   | 0.0                        | 31.0                  |
|       | 粘性土 | Dc  | 12   | 18.0                        | 8,400                       | 0.4   | 120.0                      | 0.0                   |
| 大阪層群  | 粘性土 | Oc2 | 10   | 17.0                        | 16,000                      | 0.4   | 0.0                        | 0.0                   |
|       | 砂質土 | Os' | 40   | 20.0                        | 38,000                      | 0.3   | 0.0                        | 39.5                  |
|       | 砂質土 | Os2 | 40   | 20.0                        | 38,000                      | 0.3   | 0.0                        | 39.5                  |
|       | 礫質土 | Og1 | 43   | 21.0                        | 40,850                      | 0.3   | 0.0                        | 40.4                  |
|       | 粘性土 | Oc3 | 18   | 17.5                        | 28,800                      | 0.4   | 200.0                      | 0.0                   |
|       | 砂質土 | Os3 | 46   | 20.0                        | 43,700                      | 0.3   | 0.0                        | 41.3                  |
|       | 礫質土 | Og2 | 49   | 21.0                        | 46,550                      | 0.3   | 0.0                        | 42.1                  |
|       | 砂質土 | Os4 | 45   | 20.0                        | 42,750                      | 0.3   | 0.0                        | 41.0                  |
|       | 粘性土 | Oc4 | 28   | 18.0                        | 44,800                      | 0.4   | 180.0                      | 0.0                   |

表-2 支保部材の解析用物性値

| 支保部材          | 要素種別           | 弾性係数<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 断面積<br>( $\text{m}^2$ ) | 断面二次<br>モーメント<br>( $\text{m}^4$ ) | ポアソン比 | 備 考                                      |
|---------------|----------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------|------------------------------------------|
| 導坑 支保         | シェル要素<br>(合成)  | 8.47E+06                    | 1.69E-01                | 1.62E-05                          | —     | $\sigma = 18\text{N/mm}^2$<br>H-150      |
| 専用部 吹付けコンクリート | ソリッド要素         | 6.00E+06                    | ( $t = 250\text{mm}$ )  | —                                 | 0.2   | $\sigma = 36\text{N/mm}^2$               |
| 専用部 鋼製支保工     | ビーム要素          | 2.00E+08                    | 6.35E-03                | 4.72E-05                          | —     | HH-200                                   |
| 一般部 吹付けコンクリート | ソリッド要素         | 4.00E+06                    | ( $t = 200\text{mm}$ )  | —                                 | 0.2   | $\sigma = 18\text{N/mm}^2$               |
| 一般部 鋼製支保工     | ビーム要素          | 2.00E+08                    | 3.97E-03                | 1.62E-05                          | —     | H-150                                    |
| 地中連続壁         | ソリッド要素<br>(合成) | 3.63E+06                    | —                       | —                                 | 0.3   | $\sigma = 0.5\text{N/mm}^2$<br>I-400×200 |
| ピラーコンクリート     | ソリッド要素         | 2.80E+07                    | —                       | —                                 | 0.2   | $\sigma = 30\text{N/mm}^2$               |
| エアモルタル        | ソリッド要素         | 1.50E+05<br>(150qu)         | —                       | —                                 | 0.3   | $\sigma = 1.0\text{N/mm}^2$              |
| 地盤改良土         | ソリッド要素         | (150qu)                     | —                       | —                                 | 0.2   |                                          |
| AGF 鋼管        | ビーム要素          | 2.00E+08                    | 2.04E-03                | 3.00E-06                          | —     |                                          |
| AGF(改良帯)      | ソリッド要素         | 1.00E+05                    | —                       | —                                 | 0.3   |                                          |

ラー天端において、最大13mmの水平方向変位が生じる結果となっている。また、後進坑掘削により、約10mm逆方向に変位するという複雑な挙動を示す。

一方、センターピラーの補強鋼材量は以下の方針に従って決定した。

- ① 施工中に引張応力が生じる箇所のみ鋼材で補強するものとして、常時解析結果より引張応力が発生する底盤部はH250 etc 1.0mで補強するものとした。
- ② 一次支保（鋼製支保工1mピッチ）との連続性を考慮し、同等の鋼製支保工1mピッチで補強するものとし、地震時解析及び三次元解析により妥当性を確認した。
- ③ トンネル軸方向については、局所的に作用する荷重を縦断方向に円滑に伝達させるために、RC構造物における配力筋の考え方を基に、上述の鋼製支

保工の1/6以上の断面積を有する鋼材で補強することとした。

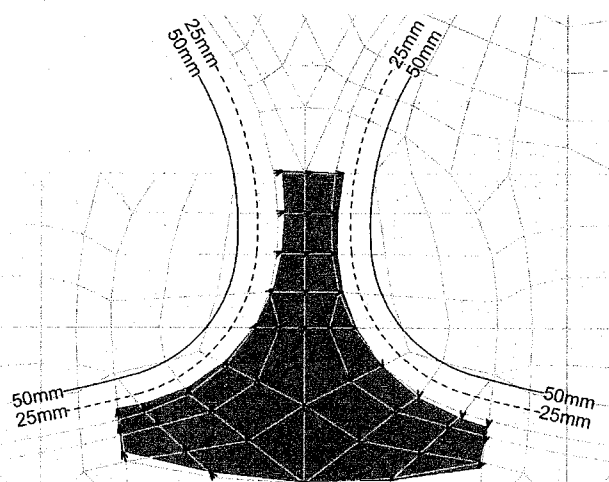


図-8 ピラーコンクリート変形図  
(先進坑上半掘削完了時)

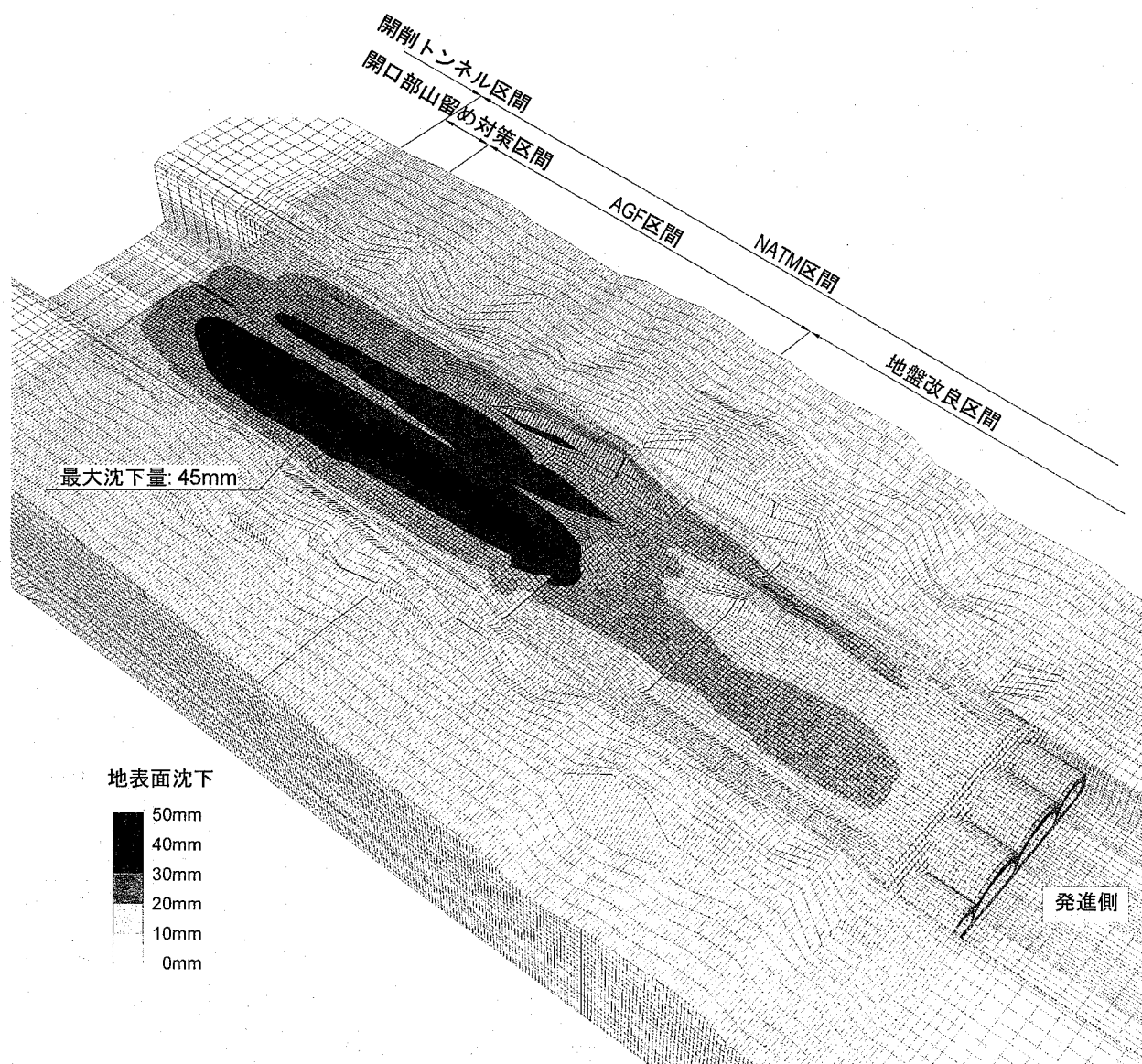


図-7 地表面沈下の分布予想図（本坑掘削完了時）

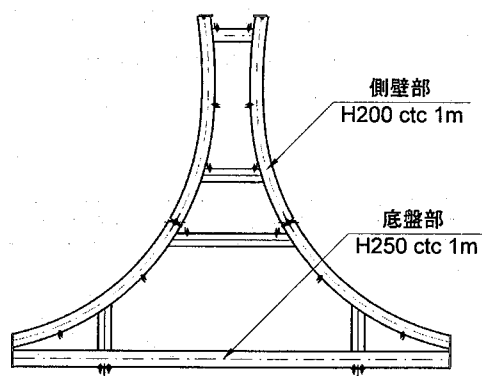


図-9 ピラー補強鋼材の配置模式図

#### 4. 予測解析と計測結果の比較

##### (1) 概説

平成19年9月現在、3本の導坑掘削および地盤改良区間の先進坑掘削のみが完了している。そこで、本章では地盤改良区間において予測解析と計測結果の比較を行い、予測解析の妥当性の検証を行う。

##### (2) 地表面沈下

図-10に先進坑掘削時の地表面沈下分布に関して、予測解析結果と計測結果を示す。当該断面における最大地表面沈下量の予測値13mmに対して、計測結果は8mm程度となっており、予測値よりも若干小さな値となっている。一方、沈下分布形状に関しては、予測解析では、専用部、一般部ともトンネル直上で沈下が卓越して凸になる傾向があるが、計測結果では、専用部の直上のみで地表面沈下が凸となっている。

##### (3) 支保工応力

表-3に平成19年9月現在の支保工応力の計測結果を示す。

表-3 支保工応力度の計測値

|        |     | 吹付けコンクリート応力<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 鋼製支保工応力                     |                             |
|--------|-----|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|        |     |                                     | 内空側<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 地山側<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
| 専用部上り線 | 天端  | 0.5                                 | 6.9                         | 9.2                         |
|        | 左肩  | -0.1                                | -15.1                       | -10.2                       |
|        | 右肩  | -1.7                                | -29.2                       | -4.1                        |
|        | 左脚部 | -0.4                                | -36.5                       | -55.5                       |
|        | 右脚部 | -1.3                                | -56.0                       | -66.2                       |
| 一般部下り線 | 天端  | -0.8                                | -3.0                        | -0.4                        |
|        | 左肩  | -0.4                                | -17.7                       | -17.6                       |
|        | 右肩  | -0.5                                | -8.8                        | -3.4                        |
|        | 左脚部 | 0.2                                 | -25.7                       | -22.7                       |
|        | 右脚部 | -0.2                                | -24.1                       | -28.3                       |
|        | 左下半 | 1.9                                 | -21.0                       | -9.4                        |

(注) 引張りを正とする

図-11に先進坑掘削時の吹付けコンクリート応力分布に関して、地盤改良区間における予測解析結果と計測結果を示す。吹付けコンクリート応力の計測結果は非常にばらつきが大きく、一定の傾向は見受けられない。ただし、解析による圧縮応力度の最大値を大きく上回るような値を示している箇所はない。

図-12に先進坑掘削時の鋼製支保工応力分布に関して、地盤改良区間における予測解析結果と計測結果を示す。圧縮応力度の最大計測値は予測値より若干小さいが、天端からSLにかけて圧縮応力度が大きくなる傾向は再現できている。また、吹付けコンクリートと同様に、予測解析による応力度を大きく上回るような値を示している計測位置はない。

##### (4) 予測解析の妥当性

吹付けコンクリートと鋼製支保工の応力度に関しては、計測結果は予測解析よりも若干小さな値を示していることが分かる。これは、トンネル周辺の地盤改良部の剛性を小さく設定していることが主な原因であると考えられる。予測解析においては、改良土の剛性として最低限確保できる程度の剛性を採用しているが、実際にはもう少し大きな剛性を有していると考えられる。そのため、予測解析においては、地山が負担する解放力の比率を小さく評価していると考えられ、結果的に実際よりも若干大きな支保工力が発生すると予測していたと考えられる。

#### 5. 結論

小路トンネルの設計・施工においては、4連めがねトンネルという特殊な構造であるため掘削工法が非常に複雑になること、およびトンネル周辺部が住宅密集地であること等を勘案して、精度の高いトンネル掘削時挙動予測を行うことを目的とした大規模な三次元解析を実施した。この予測解析の結果をもとに、管理基準値を設定して掘削時の計測管理を実施している。現在のところ、トンネル掘削時の挙動は予測範囲内に収まっており、順調に施工を進めているところである。

謝辞：本検討をを実施するにあたり、ご指導を頂いた4連めがねトンネル施工検討委員会（足立紀尚委員長）の委員の方々に、この場を借りてお礼申し上げます。

##### 参考文献

1) 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.

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.

2) 森正明, 中野将宏, 白川賢志, 大島基義: 人家密集地

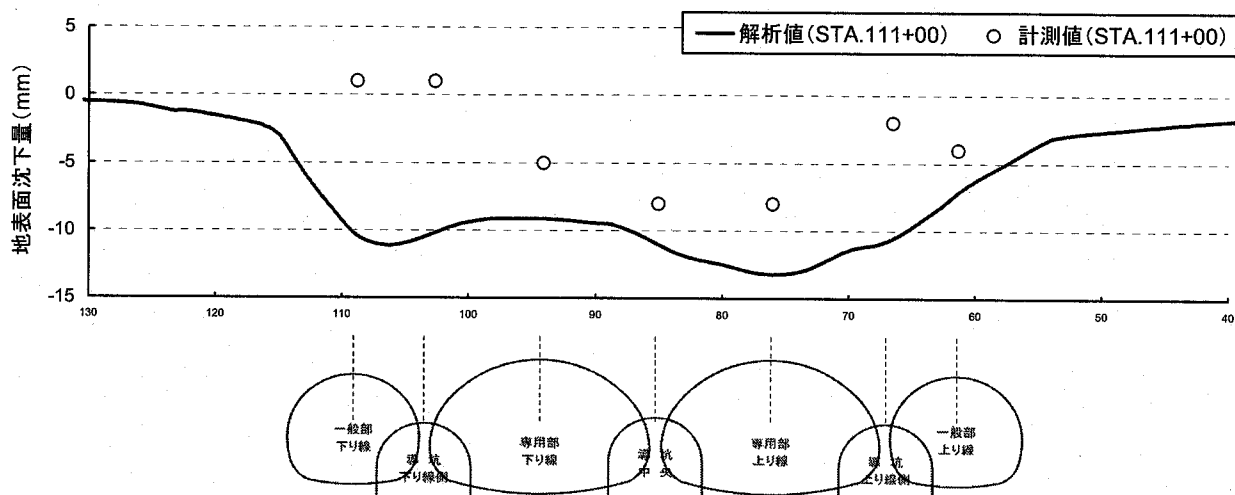


図-10 地表面沈下量の比較

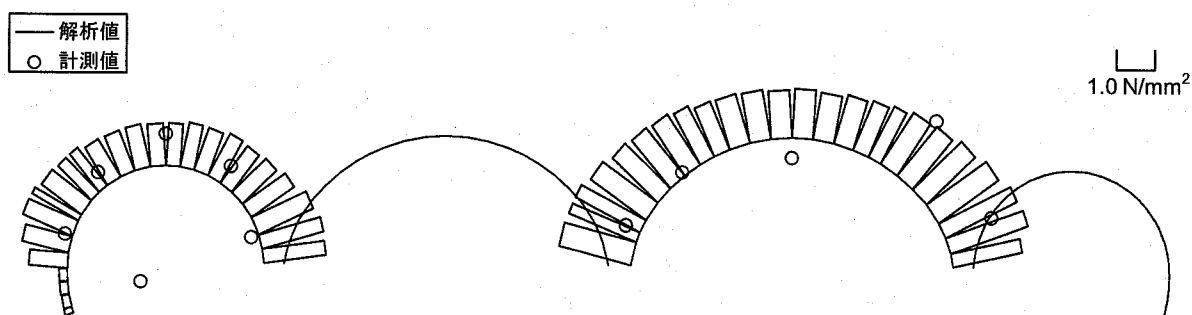
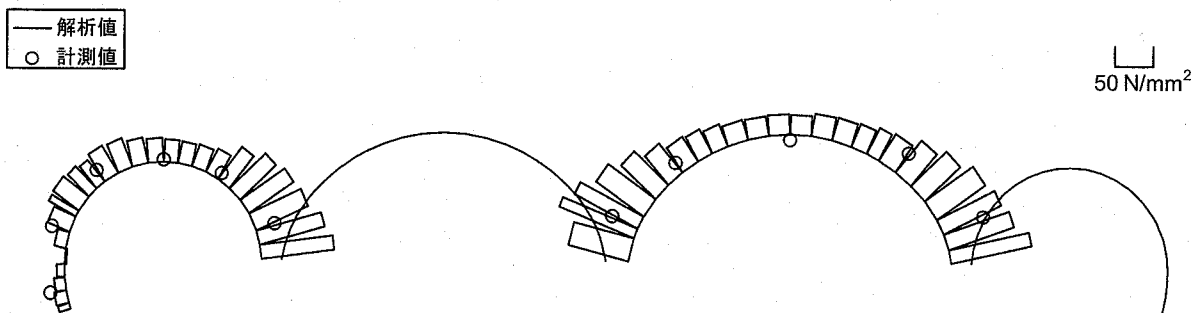


図-11 吹付けコンクリート応力の比較

①内側(トンネル内空側)



②外側(地山側)

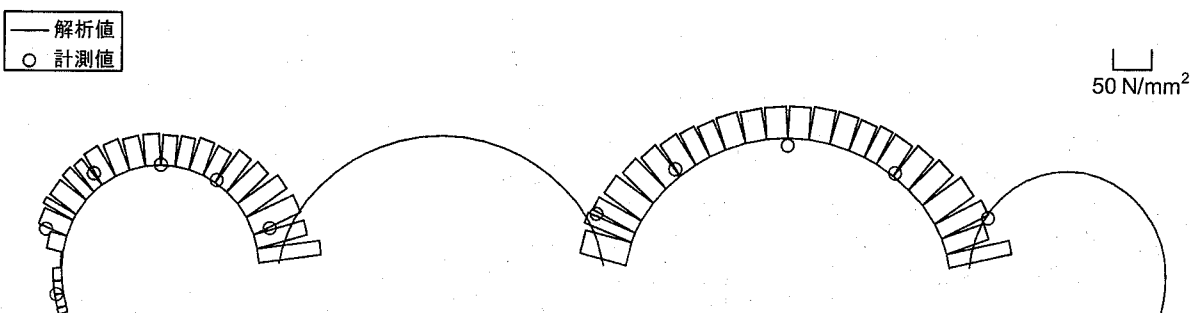


図-12 鋼製支保工応力の比較