

# 大断面トンネル交差部（シールドマシン転回部）の設計と施工

大阪建設局 工事部 工事管理課 西岡 敬治  
京都建設部 設計課 仲 義史  
京都建設部 設計課 河本 一郎  
京都建設部 伏見工事事務所 井手口 昭

## 要 旨

新十条通は全長約2.8kmの内、約2.5kmがトンネル構造であり、主に山科側約1460mはNATM工法、伏見側約850mをシールド工法で計画されている。NATM工法区間の西端部には、伏見側を掘削するシールドマシンを転回させるための連絡坑を施工した。この連絡坑付近は過去に例を見ない大断面トンネル交差部を形成し、複雑な三次元応力状態を作り出すと考えられる。

本大断面トンネル交差部（シールドマシン転回部）の設計では2次元及び3次元のFEM解析を用いて、支保工の仕様等を決定した。さらに、施工にあたっては、計測結果をもとに逆解析を実施し、それを基に次のステップの変形状態を予測しながら、施工することにより経済的、合理的かつ安全な支保工への変更や補強を適切な時期に実施することができた。本稿では、これら大断面トンネル交差部の設計概要及び情報化施工について述べる。なお、本大断面トンネル交差部は、以上の検討解析結果を反映した施工を行い、平成14年2月に完了している。

キーワード：NATM、大断面トンネル交差部、情報化施工、三次元応力状態、逆解析

## 1. はじめに

京都市道高速道路1号線（新十条通）は、京都市伏見区深草と山科区西野山を結ぶ全長約2.8kmの路線で、その大部分がトンネル区間である。当該トンネルは双設で、図-1に示すように山科側から坑口付近約70mの明巻トンネル区間、東山連峰の下を貫く約1460mの山岳NATM工法区間、伏見側都市トンネル区間は約850mのシールド区間と約150mの開削トンネル区間の4つの異なる工法によって構成されている。シールド区間は、伏見区深草に作られた発進立坑からまず西行線を掘削したシールドマシン（外径約11m、機長約12m）を、大断面トンネル交差部（シールドマシン転回部）でUターンさせ、東行線側から再発

進する計画である。

大断面トンネル交差部は、図-2～図-5で示すように、シールドマシンを通過させるための大断面の本坑及び転回させるための連絡坑から成り立っている。NATMで掘削する大断面トンネル交差部本坑は掘削高約16m、掘削幅約17m、断面積約240m<sup>2</sup>と標準部の3倍弱の大断面となっており、これと交差する連絡坑も掘削高約13m、掘削幅約13m、断面積190m<sup>2</sup>の大断面である。

このような、地下における過去に例をみない大断面の交差は付近の地盤に複雑な三次元応力状態を形成すると考えられる。

交差部の位置は、稲荷山西端部において、NATMトンネル内から水平ボーリング調査を行い、稲荷山断層の破碎帯を避け、比較的安定したチャート

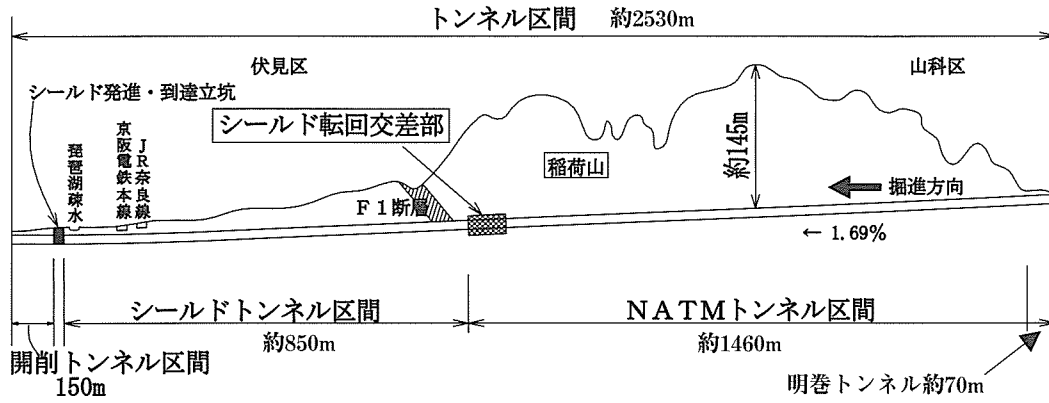


図-1 トンネルの概要

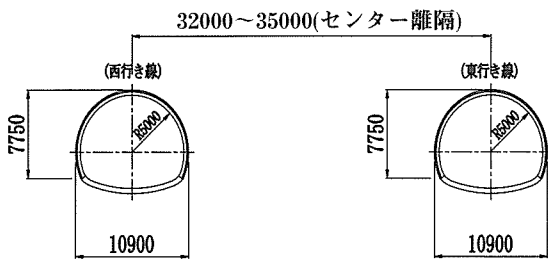


図-2 NATM区間断面図 (標準部)

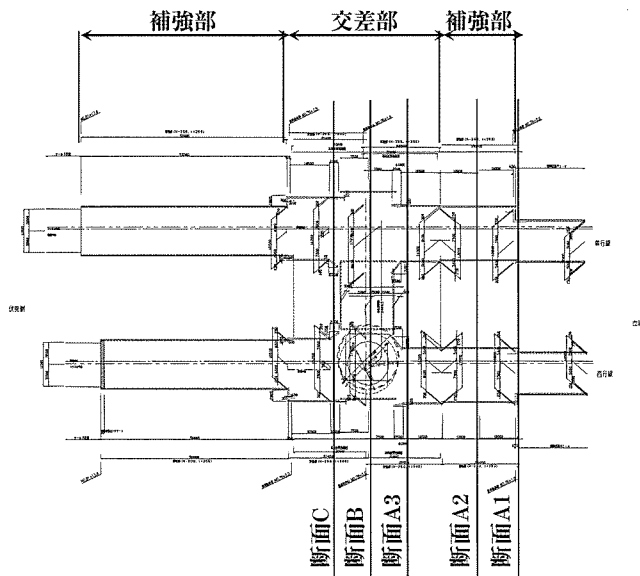


図-3 交差部平面図

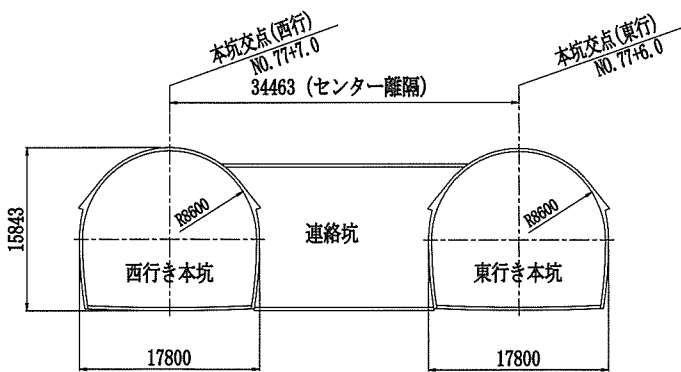


図-4 交差部センター断面図

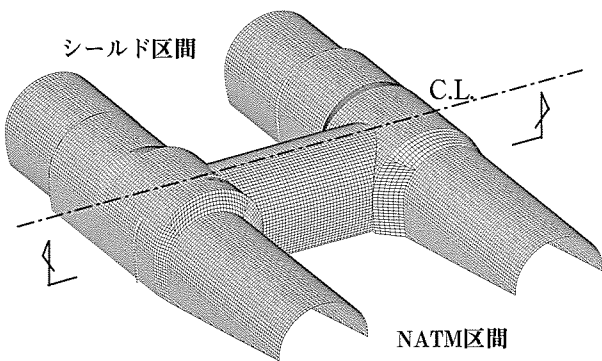


図-5 交差部鳥瞰図

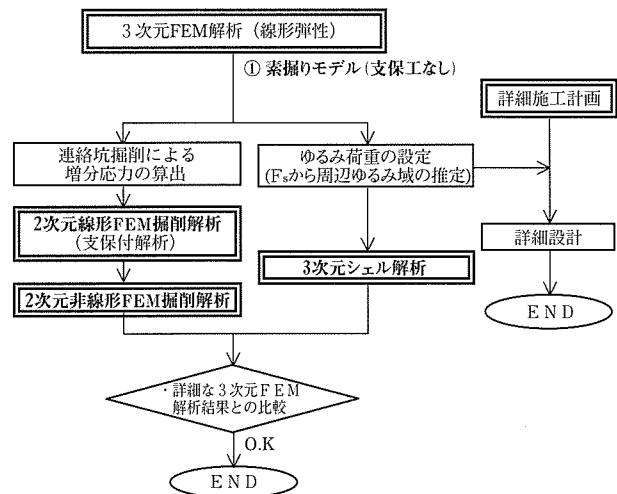


図-6 交差部設計フロー

やCH級岩盤の分布している地点に決定した。

本稿では、大断面トンネル交差部のFEM解析を用いた設計及び情報化施工を取り入れ事前予測を行いながら慎重に掘削を進めた施工について述べる。

## 2. 大断面トンネル交差部の設計

大断面トンネル交差部は、図-6に示す設計フローに基づき設計を行った。

本トンネルの大断面トンネル交差部は過去の地下交差部の設計・施工実績と比較して、以下の特徴がある。

- ①地盤条件が比較的悪い（CⅡ～DⅡ相当）。
- ②トンネル同士が非常に近接している。
- ③大断面トンネル同士の交差である。
- ④大断面トンネル交差部を施工する場所は稲荷山西端部にあたり、地表面が急傾斜した土被りの変化する箇所である。

設計ではこれらの点を考慮し、まず3次元FEM解析を適用する。交差部掘削に伴う周辺地山の応力集中度合いを見極め、3次元的な周辺地山の地山挙動（緩み領域）を把握した。次にこの結果を2次元FEM解析に盛り込み、周辺地山と支保構造との応力状態を再確認した。また非常に複雑な支保構造となる交差部付近については3次元shell解析も併用し、支保構造の設計を行った。以下、各解析について簡潔に述べる。

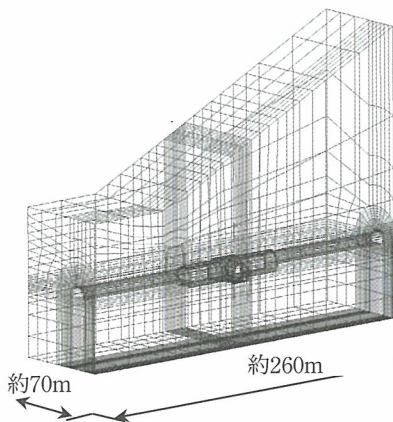


図-7 3次元FEMモデル

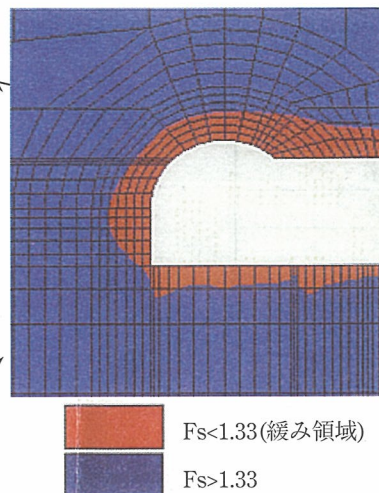


図-8 緩み領域

### 2-1 3次元FEM解析

交差部掘削に伴う3次元的な周辺地山の挙動（緩み領域）の把握を目的とし、図-7に示すように、支保工はモデル化せず、表-1に示す5ステップの解析を行った。地盤物性値は本坑トンネルの既施工区間における計測結果を用いて逆解析を行い、算出された値を用いている。（表-2）

緩み領域を把握するにあたり、地山が非線形領域に入るときの局所安全率Fsを弾性限界パラメータk(=4)から算出したところ、Fs=1.33であったため、3次元FEM解析の結果Fs<1.3となる部分を緩み領域とした。解析の結果、交差部付近の緩み領域が最も大きく、緩み高さが約4mとなった。（図-8）

### 2-2 2次元FEM解析

本解析は交差部・補強部の施工ステップを考慮した支保構造を設計することを目的としている。3次元FEM解析で算出された連絡坑掘削に伴う増分変位量を荷重に換算し、その値を当モデルに載荷した。本解析では、表-3に示すように施工ステップを細かくモデル化し各施工段階における各支保工の健全性についての確認を行っている。

解析の結果を図-9に示す。下半掘削時には応力集中箇所が、下半脚部であることが判明した。また、解析の結果一部に許容値を超える応力発生が見られたが、情報化施工により対処することとした。

表-1 解析ステップ

STEP1	初期応力の算定
STEP2	本坑上半掘削解放(100%)
STEP3	連絡坑上半掘削解放(100%)
STEP4	本坑下半掘削解放(100%)
STEP5	連絡坑下半掘削解放(100%)

表-2 3次元FEM解析用  
地盤物性値

単位体積重量	21kN/m <sup>3</sup>
変形係数	800N/mm <sup>2</sup>
ポアソン比	0.35

### 2-3 3次元shell解析

非常に複雑な支保構造となる大断面交差部における、完成時の3次元応力を把握するため、表-4で示す方法で部材をモデル化し、3次元Shellモデルを作成し、各部材の応力照査を実施した。

図-10に示すとおり完成形においては、連絡坑と本坑の交差部分に局所的に大きな応力が発生することが分かった。交差部の支保構造は2-2で述べた2次元FEM解析の結果を基本に当解析結果も包括するように設計を行った。

結果、支保工はもっとも応力的に厳しい、交差部付近において鋼製支保工NH-250、吹付けコンクリート  $t=300\text{mm}$ と決定した。(表-5)

本大断面トンネル交差部はシールドマシンを転回するまで、以上に基づき設計された支保構造で安定させ、その後二次覆工にて長期的に安定させるため、支保構造は短期的なものだけでなく中長期的な耐荷性能を有する必要がある。検討結果では一

部に短期許容応力度を超過する部分が見られたが、応力が集中している箇所が交差部付近に偏っており、局所的であることからこの仕様に決定した。しかし、地盤状況等の変化により補強を必要とする可能性もあるため、補強余裕として200mm見込んで施工することとし、情報化施工により必要に応じて、増吹きによって対処することとした。

## 3. 大断面トンネル交差部の施工

### 3-1 情報化施工

前節で述べた様々な解析を実施し、大断面トンネル交差部の支保構造を決定した。交差部付近の支保工パターン図を図-11に示す。

本大断面トンネル交差部の施工にあたっては、施工時に各種計測を行い、交差部の挙動をとらえ、結果を総合的に判断して、設計・施工に反映することが極めて重要である。本節では、計測計画及び結果を含めた情報化施工について述べる。

表-3 解析ステップ

STEP1	初期応力の算定
STEP2	西行線上半掘削解放50%
STEP3	西行線上半支保建込50%
STEP4	東行線上半掘削解放50%
STEP5	東行線上半支保建込50%
STEP6	連絡坑上半掘削影響
STEP7	西行線下半掘削解放50%
STEP8	西行線下半支保建込50%
STEP9	東行線下半掘削解放50%
STEP10	東行線下半支保建込50%
STEP11	連絡坑下半掘削影響

表-4 部材のモデル化

	モデル化方法
鋼製支保工	Beam要素
吹付けコンクリート	Shell要素
ロックアンカー	バネ支承
地盤	バネ支承 (Non-Tension)

表-5 支保工仕様

	交差部		補強部	
	$\sigma_{ck}=36 \text{ (N/mm}^2\text{)}$		$\sigma_{ck}=24 \text{ (N/mm}^2\text{)}$	
	H鋼	吹付けコンクリート	H鋼	吹付けコンクリート
D I	NH-250@1m	t=30cm	NH-200@1m	t=25cm

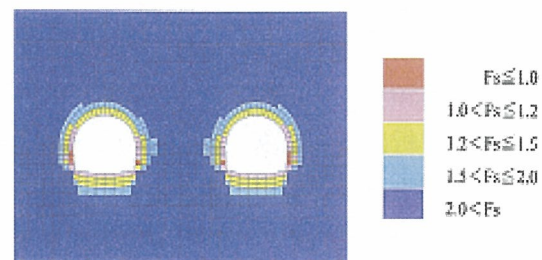


図-9 2次元FEM解析結果

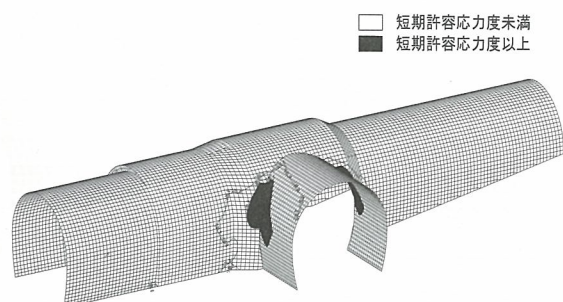


図-10 吹付けコンクリート発生応力分布図

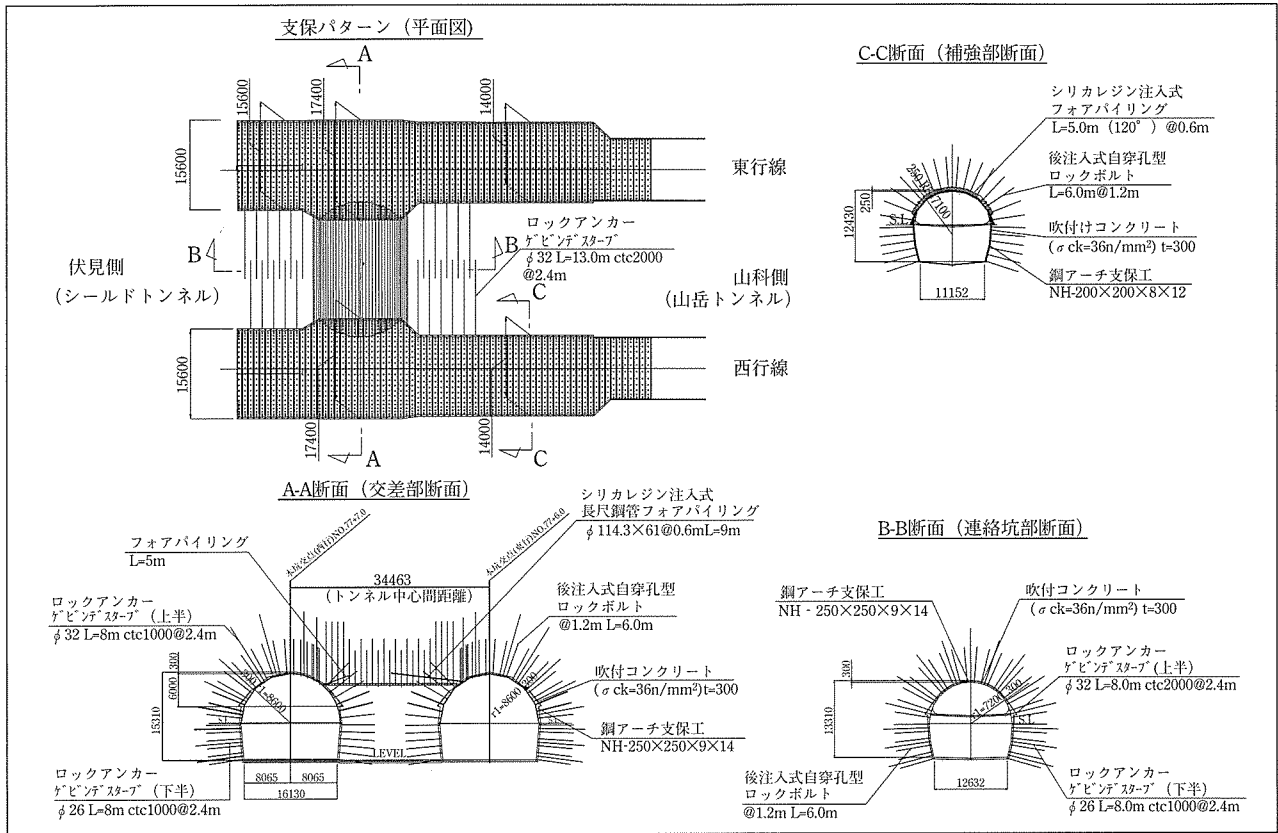


図-11 交差部付近支保パターン (基本設計時)

### 3-2 計測計画及び結果の評価

施工にあたって計測を行った項目を表-6に示す(位置については図-3参照)。主計測断面は、連絡坑掘削に伴い最も応力集中が大きいと思われるA3断面とし、この断面の計測結果を中心に、A1~Cの各断面の計測結果も含めて総合的に判断し情報化施工を実施した。

図-13~図-15に計測結果を示す。図-13より、天端沈下量、内空変位とも掘削の段階毎に増加しているがすぐに収束し、掘削完了後も収束する傾向がうかがえる。図-14、図-15に示す鋼支保工、吹付けコンクリート応力いずれについても、掘削完了後収束する傾向がうかがえる。また、変位量・支保部材の応力とも東行線のほうが西行線と比較して大きな値となっている。施工時の切羽状態は、西行線がC II~D I相当地盤、東行線はD I~D II相当地盤と差があり、東行線が相対的に軟弱な地盤条件であることに起因すると考えられる。

また、図-16に示されるロックボルト軸力測

表-6 各断面の計測項目

	A1	A2	A3	B	C
A 計 測	○	○	○	○	○
鋼アーチ支保工応力測定		●	○	●	
吹付けコンクリート応力測定		●	○	●	
ロックボルト軸力測定		●	○	●	
地 中 変 位 測 定		●	○	○	
○東西両方 ●西行きのみ					

定結果(A3断面)より周辺地山の緩み領域は4m~5m程度とみられ、これは3次元FEM解析によって推定された緩み領域とほぼ同一である。

### 3-3 逆解析と施工

逆解析は本坑上半掘削完了時におけるトンネル内空変位(天端沈下、水平内空変位)および支保工応力をトレースした。逆解析パラメータとして地盤変形係数、初期側圧係数、支保工剛性を用いて各数値を逆算した。逆解析は切羽の進行が早く、より地盤条件の悪い東行線の上半掘削完了時点で行った。

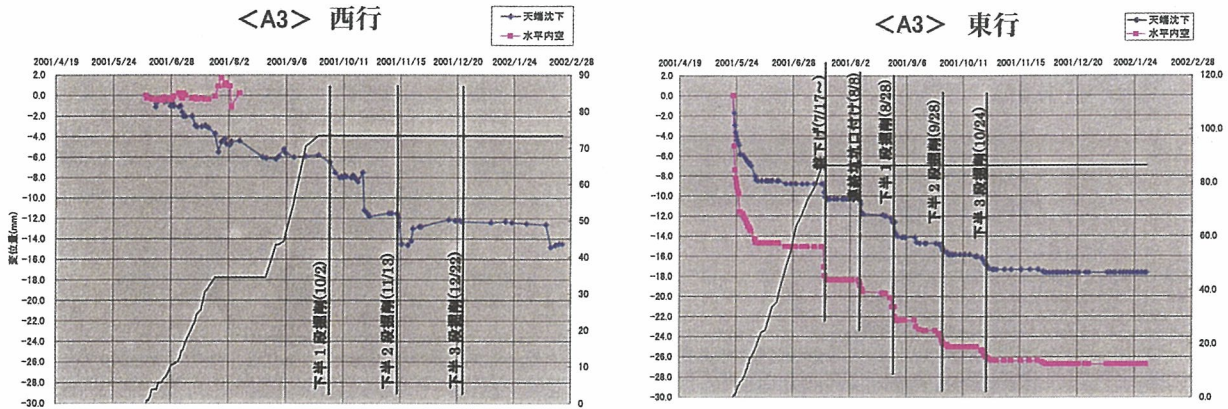


図-13 A計測結果 (A3断面)

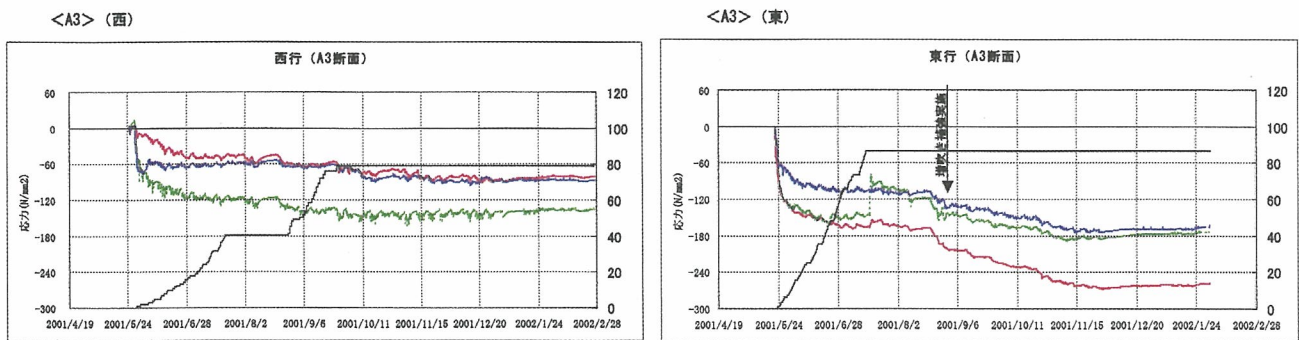


図-14 鋼支保工応力

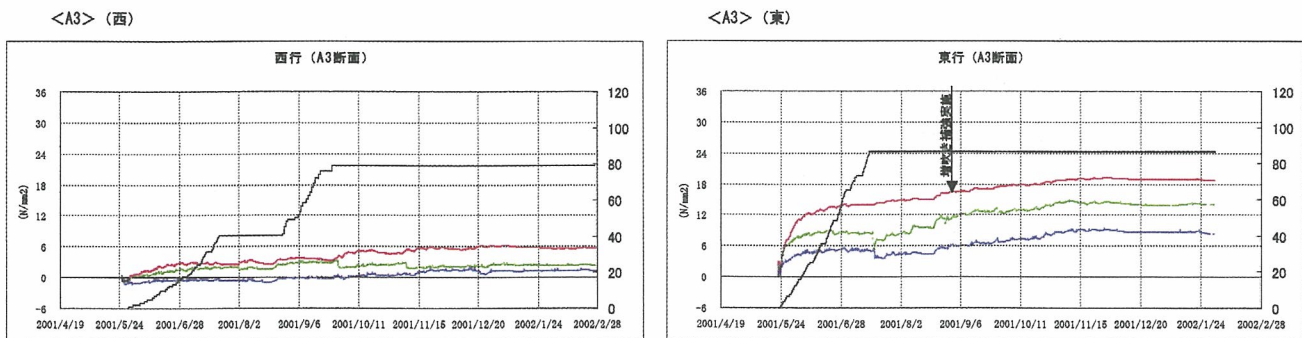


図-15 吹付けコンクリート応力

解析の結果、表-7に示すように逆解析により求められた地盤の変形係数 ( $E = 863\text{N/mm}^2$ ) は当初想定していたD I相当地盤の値とほぼ同程度であった。

当初設計時は交差部付近を比較的悪い地盤 (D I ~ D II) であると想定し、緩み抑制に効果的な先受け工 (フォアパイリング) にて連絡坑取付部上部の構造の安定を図ることとしていた。しかし、逆解析の結果、中央部付近の地盤については、C II相当であり比較的堅固な岩盤であることが分かったため、フォアパイリングの規模を縮小し、ロッ

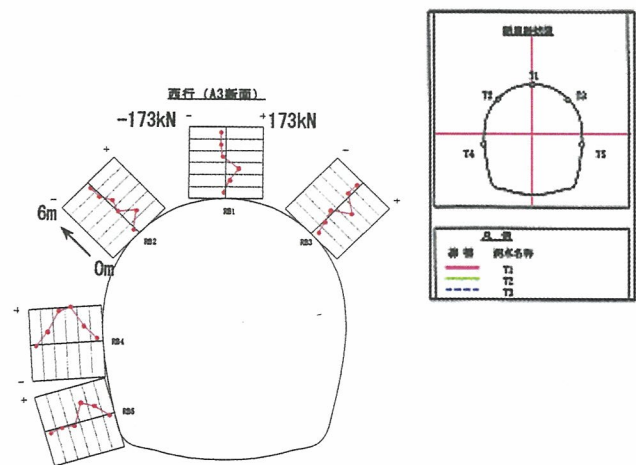


図-16 地中変位測定結果

表-7 逆解析結果

INPUT DATA (計測値)			OUTPUT DATA (逆解析結果)	
天端沈下		9.0mm	地盤の変形係数	863N/mm <sup>2</sup>
水平内空変位		8.8mm	初期側圧係数	1.88
支保工応力	吹付con	165N/mm <sup>2</sup>	吹付con	24N/mm <sup>2</sup>
	H鋼	14.0N/mm <sup>2</sup>	弾性係数	

クアンカーを中心とした補強を行うこととした。

また、本坑間側部構造については、当初ロックアンカーでは緩み領域が重なり定着できないため緊結アンカーにて押し出しに抵抗することとしていた。しかし、逆解析や水平ボーリング、削孔検層等により、地盤の状況を詳細に把握したところ、交差部付近の地盤はD I相当以上であることが判明したため、本坑間側部補強についてもロックアンカーにて行うものとした。

### 3-4 予測解析及び施工

逆解析で得られた地盤物性値をもとに下半掘削時の予測解析を実施した。本解析では、十施工における掘削スピードの差を考慮し、図-17で示すように東行が西行より下半ベンチ2段先行した解析とした。

解析の結果を図-18に示す。先行する東行線の支保工への応力が先行的に作用することが予測された。この結果より支保工の健全性を照査したところ、鋼アーチ支保工応力の最大値が303N/mm<sup>2</sup>と耐力( $\sigma_{ck}=235\text{N/mm}^2$ )を大きく上回り、吹付けコンクリート応力についても最大値が33.1N/mm<sup>2</sup>と耐力( $\sigma_{ck}=353\text{N/mm}^2$ )とほぼ同等の値となり安全率が1.0程度しか確保されないことが分かった。このため、吹付けコンクリートの増吹き10cmを実施して対応することとした。図-18に示すとおり、補強実施後から、計測値が予測値より下回り、安全率は表-8に示すとおり1.28まで改善し、補強の効果を確認することができた。

## 4. おわりに

大断面トンネル交差部の設計にあたっては、まず2次元、3次元のFEM解析を実施し、掘削に伴

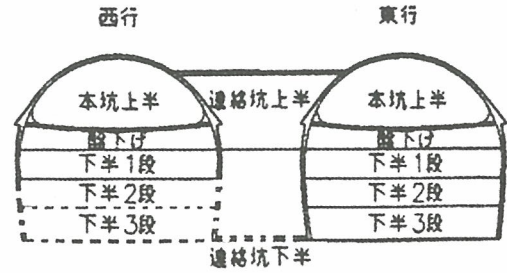
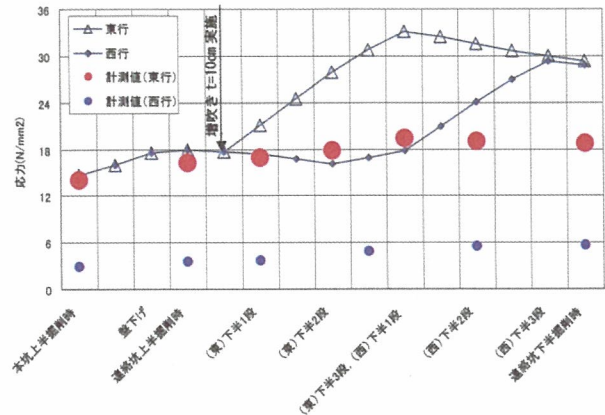
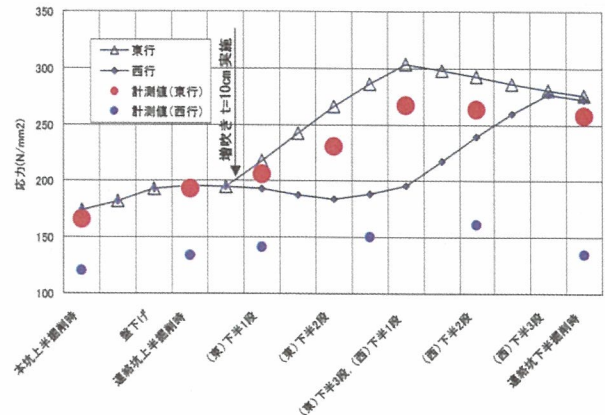


図-17 下半二段ベンチ差



吹付けコンクリート応力



鋼アーチ支保工応力

図-18 予測解析の結果

表-8 支保部材安全率

支保構造	現行支保	増吹き(t=10cm)
支保工耐力まで発生させた時に支え得る軸力(kgf/cm <sup>2</sup> )	1299	1654
予測解析により得られる最大合成軸力(kgf/cm <sup>2</sup> )	1298	1298
安全率	1	1.28

う地山状況の事前予測を行い、設計支保構造の照査を行った。実施工にあたっては、随時計測を実施することによって、現場状況を常に把握するとともに掘削の進捗に応じた計測データを用いた逆

解析及び情報化施工を実施することによって、合理的かつ経済的な支保構造を適用することができ、その結果地山の緩みを最小限に食い止めることができた。本稿で述べた一連の解析、計測、情報化施工を実施することにより、合理的、経済的かつ安全に大断面トンネル交差部を施工することができた。(写真-1に施工完了後の写真を示す。)

謝辞：最後に、大断面トンネル交差部の設計・施工にあたり多大なご指導、ご意見をいただいた「京都高速道路トンネル技術委員会」の足立紀尚委員長、大西有三幹事長をはじめとする委員各位、また現場における施工にご尽力された稲荷山工区(西行)トンネル工事(鹿島・大成建設工事共同企業体)、稲荷山工区(東行)トンネル工事(西松・清水建設工事共同企業体)の関係者の皆様に誌面をお借りして感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 西岡敬治, 石原洋他: 大断面トンネル交差部大断面交差部の設計(その1) - 京都市道高速道路1号線 稲荷山トンネル -, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp66-67, 2001.
- 2) 青柳隆浩, 畝田篤志他: 大断面トンネル交差部大断面交差部の設計(その2) - 京都市道高速道路1号線 稲荷山トンネル -, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp68-69, 2001.
- 3) 青柳隆浩, 畝田篤志他: 大断面トンネル交差部大断面交差部の施工 - 京都市道高速道路1号線 稲荷山トンネル(その3) -, 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-278, 2002.
- 4) 西岡敬治, 河本一郎: 大断面トンネル連絡坑の設計, 第24回日本道路会議一般論文集, pp84-85, 2001.



写真-1 交差部写真

#### DESIGN & CONSTRUCTION OF LARGE CROSS-SECTIONAL JUNCTION FOR SHIELD DRIVING METHOD

Takaharu Nishioka, Yoshifumi Naka, Ichiro Komoto, and Akira Ideguchi

The Hanshin Expressway Public Corporation constructs by designing Shinjujudori. This road is about 2.8 km long, among those the plan is made by the NATM method of construction about 1.5 km the Yamashina side, and is made by the shield driving method about 850 m the Fushimi side. Large cross-sectional junction for shield machine U-turn was constructed in the west end part of the NATM method. This forms a large cross-sectional junction of a type not built before, creating more complicated 3D stress. Computerized execution by the reverse analysis that the design outline of that section and a result of measurement were enforced, and the prediction analysis is settled.

This cross-sectional junction was constructed in February, 2002.