

特殊な構造のトンネル交差部の設計と施工

Design and execution of a tunnel intersection area with special structure

早坂 治敏¹⁾、田村 信吾²⁾、筒井 隆規³⁾、黒坂 聡介⁴⁾、寺島 佳宏⁵⁾

Harutoshi HAYASAKA, Shingo TAMURA, Takanori TSUTSUI, Sousuke KUROSAKA, Yoshihiro TERASHIMA

In Tsukinoki site of Hakkoda Tunnel, for various facilities in the intersection area, its shape is complicated and the section area is large. Behavior in tunnel excavation was analyzed by 3D finite element method, and the propriety of the design was confirmed by measuring behavior of support members in execution. Because it was difficult to understand complicated execution procedure and 3D shape, by using 3D CAD in a design stage, it was easily able to visualize execution method at each stage, and reinforcement at cutting location of a support.

Key Words : Intersection, FEM, Measurement, CAD, Visualization

1. はじめに

東北新幹線八甲田トンネル^{1), 2)}は、青森県の中央部を占める八甲田山系の北端に位置する延長 26.455km の長大山岳トンネルであり、このうち築木工区は、起点側から 5 番目の工区で本坑延長 4,230m に工事用斜坑 950m を伴う工事である。斜坑は断面を拡幅して本坑と交差角度が 53.4° の鋭角で交わる上に、交差部付近には電気設備等設置坑(SSP)やポンプ室が、また、交点は矩形的電気ケーブルヘッドが計画されており、全体の形状が特殊で複雑なものである(図-1)。

本稿では、当工区の斜坑と本坑との交差部の設計・施工・計測について述べるとともに、交差部を 3 次元 CAD・CG を利用して設計および施工段階の支援に用いた試みについて報告する。

2. 交差部の設計

2.1 交差部の地質

交差部付近の地質状況を確認するために実施した地質調査ボーリング結果と斜坑の地質実績から推定し作成された地質平面図を図-2に示す。交差部付近の地質は、主に四ツ沢層泥岩(Ym)と細粒凝灰岩(Yt)より成り、それに玄武岩(Yb)および石英安山岩(Da)が複雑に貫入しているものと想定された。施工上問題となる破碎帯や変質帯は確認されなかったが、一部区間で亀裂が発達するとともに、地質の変化が著しいと判断された。

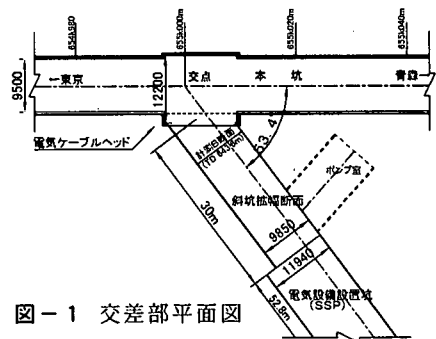


図-1 交差部平面図

- 1) 正会員 日本鉄道建設公団 盛岡支社 工事第三部 工事第五課長
- 2) 正会員 日本鉄道建設公団 盛岡支社 青森鉄道建設所
- 3) 正会員 飛島・大日本・株木・鹿内 東北幹、八甲田T(築木)他特定建設工事共同企業体
- 4) 飛島建設株式会社 土木本部 土木技術部
- 5) 飛島・大日本・株木・鹿内 東北幹、八甲田T(築木)他特定建設工事共同企業体

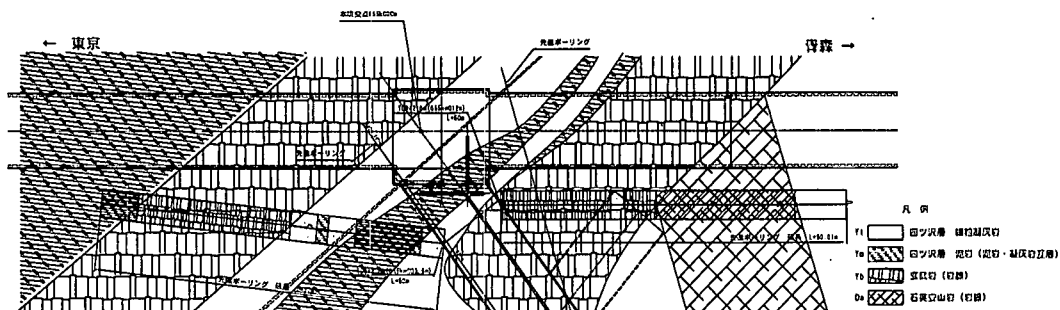


図-2 交差部の地質平面図

2.2 交差部の支保構造の設計

交差部の支保構造は、基本的に、先進調査ボーリングにより地質状況が判明した段階で、地山分類に応じた支保パターンを選定するものとした。しかし、地質が判明してから交差部の影響を検討し支保パターンを設定していたのでは、施工の進捗に影響を与えることになるため、事前にトンネル掘削の影響を検討し、補強範囲と支保規模を設定した。交差による各トンネルへの影響検討は、既往の研究成果や施工実績などからその影響範囲や支保規模を設定する場合が多い。しかし、本交差部のような特殊な構造の場合、従来の方法では実際に適した合理的な支保の検討は難しい。そこで、これらの複雑な形状をモデル化した3次元有限要素解析によって、交差による影響を検討した。具体的には、地質が不明な点と、対応の迅速さを考慮して以下の手順で検討した。

- ①交差による影響を地山の応力レベルで捕らえることを主眼とし、モデルは支保要素を考慮しない素掘りモデルとし、解析は線形弾性解析とした。
- ②各トンネルの交差のない単一トンネルモデルと、交差形状モデルでの解析を同一条件で実施し、各々の解析結果の発生応力の比率(応力集中度)を算出した。入力定数は、地質条件が不明であるため、中硬岩・軟岩Ⅱ_Yの一般的な値を用い、比較する応力はSL部の最大主応力とした。

$$\text{応力集中度 } S = s_2 / s_1$$

(1)

s_1 : 単一トンネルでの発生応力

s_2 : 交差形状での発生応力

- ③補強区間設定の目安となる応力集中度を、吹付けコンクリートの段階的な厚さによる耐力の幅を考慮して求め、その値以上の区間を補強区間として設定した。具体的には、吹付け厚15cmの場合を基準とし、次段階の20cmとの中間値を耐力の幅として目安値を以下とした。

$$\text{区間設定目安値 } S_0 = 17.5 / 15.0 = 1.17$$

- ④補強区間においては、応力集中度の大きさに応じ、各トンネルごとに標準支保に対する相対的な支保規模の増加量を設定した。

- ⑤先進ボーリングにより地質が明確になった段階で、斜坑の施工実績などから地山相当の標準支保を設定し、それに対して④で設定した増加量から、具体的な補強規模を設定した。

以上の方法で検討した結果、1.17以上の応力集中度を目安として設定した補強区間は、一般的に設定されてい

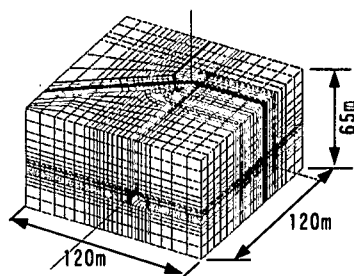


図-3 解析モデル

表-1 入力物性値

単位体積重量	20 kN/m ³
変形係数	100 N/mm ²
ポアソン比	0.3

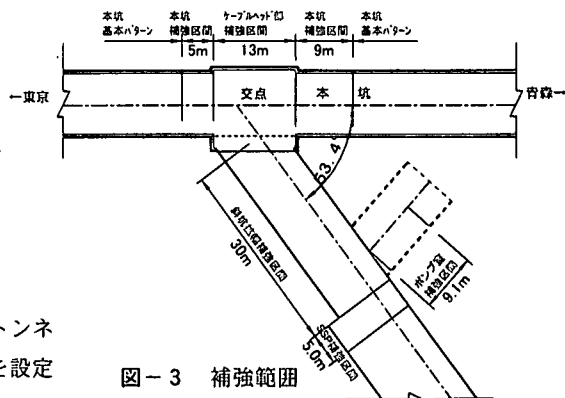
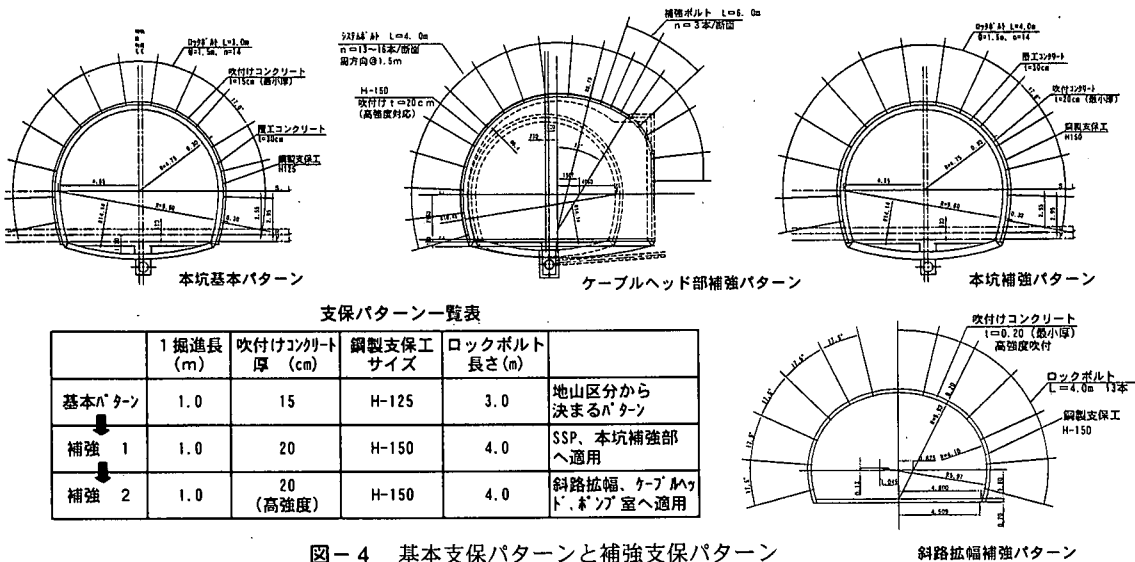


図-3 補強範囲

る区間(鋭角側 2D、鈍角側 1D、D：トンネル掘削幅)に対して、鋭角側は 1.7D、鈍角側 0.5D であった。また、支保規模増加量の目安は、長期的には吹付けコンクリートの荷重分担が大きいことを考慮し、主に吹付け厚に対して設定した。具体的には、応力集中度が 1.17 を越える区間に対して、まず吹付けコンクリートの厚さを 5cm 増加することで対応した。そして、それ以上の支保耐力が必要な区間については、吹付けコンクリートの強度増加で対応し、検討の結果、設計基準強度 30N/mm² を適用した。また、吹付けコンクリートの厚さに応じたサイズの鋼製支保工を配置し、初期の地山荷重を負担させるとともに支保構造に靱性を持たせた。電気ケーブルヘッド部は大断面でかつ構造上矩形に掘削することになるため、割れ目による岩塊の抜け落ちなどの対策と開口部の補強を考慮して、補強プレート(PL-200×22)と補強ロックボルト(L=6m)で対応した。



図－４ 基本支保パターンと補強支保パターン

3. 交差部の施工

交差部の施工は以下に示す順序で実施した。なお、主要施工機械を表－２に示し、施工手順を図－５に示す。

① Step1 斜坑～本坑東京側上半施工

斜坑拡幅断面で交差部へ角度 53.4° で進入し、交差部手前より平面線形、縦断勾配および断面形状を徐々に本坑上半断面にすり付けていった。後の本坑拡幅断面の掘削で撤去される部分の鋼製支保工は仮設的な意味合いから 1 ランク下げたものとし、同様にロックボルトはグラスファイバーボルトを使用した。また、途中で切断される区間の斜坑の鋼製支保工の切断箇所は予めプレート(PL-200×22)とロックボルト(L=6m)で補強した。そして、本坑上半にすり付いた後は、東京側へ 30m の上半施工を基本パターンで実施した。

② Step2 交差部本坑拡幅断面～青森側上半施工

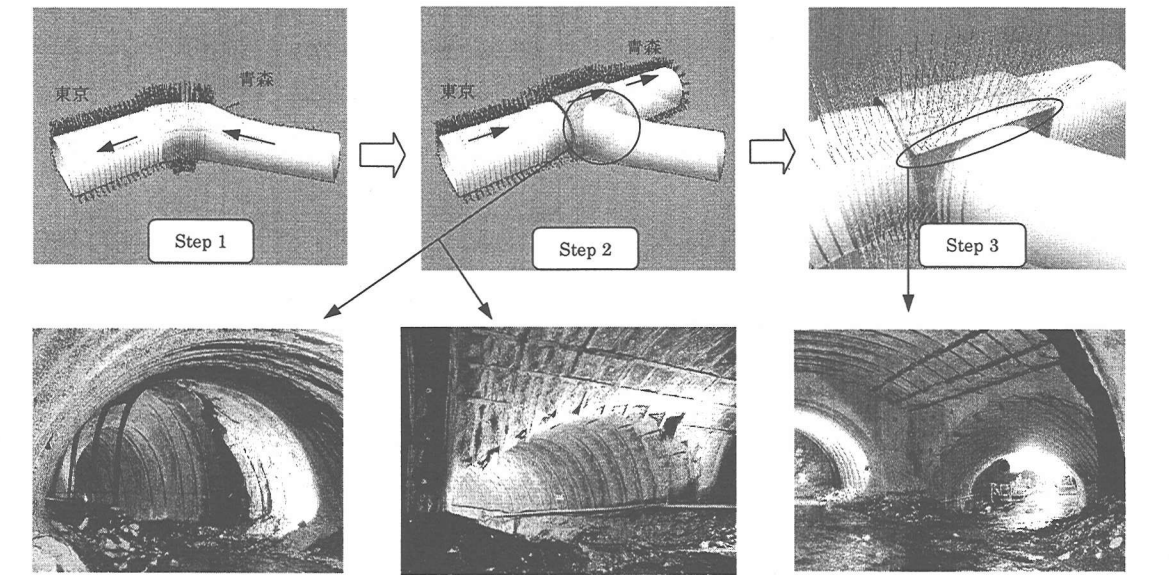
東京側から青森側に向かい、斜坑すり付け部の支保を撤去しながら本坑拡幅断面上半施工を進めていった。拡幅区間の斜坑側の鋼製支保工は、施工時はアーチ構造を保持するために一旦掘削盤まで足付けをしたが、この区間は将来的にケーブルヘッドとして矩形断面になることから、鋼製支保工をプレート(PL-200×22)で溶接結合しロックボルト(L=6m)で補強した後足付けした鋼製支保工を切断するという順序で施工を進めた。なお断面変化部の妻部は 4m のロックボルトで補強した。拡幅区間の施工に引き続き、青森側へ標準断面上半施工を、9m は補強支保パターンで、以降 40m は基本パターンで施工した。

③ Step3 ケーブルヘッド矩形部の施工

表－２ 主要使用機械

施工区分	機 械 名	型式・仕様
掘 削	ホイールジャンボ	190kg 級 2B×1C
こ そ く	油圧ブレーカ	油圧式 1300kg 級
ずり積込	シャフロダ	KL-41、0.3m ³
	ホイールローダ	2.3m ³
ずり搬出	ダンプトラック	25t
吹 付 け	吹付けシステム機	GMB35CTNL、20m ³ /h

計測により変位挙動の収束と支保部材の発生応力を確認した後、ケーブルヘッド矩形部を施工した。この箇所は Step2 の拡幅区間の施工で設置した鋼製支保工を部分的に切断したが、そこは新たに天端鉛直上向きにプレート(PL-200×22)とロックボルト(L=4m)で補強し、斜坑側に発生した妻部はロックボルト(L=4m)で補強し安定を図った。その後交差部の下半およびインバートを施工した。



図－5 施工順序

4. 交差部の計測

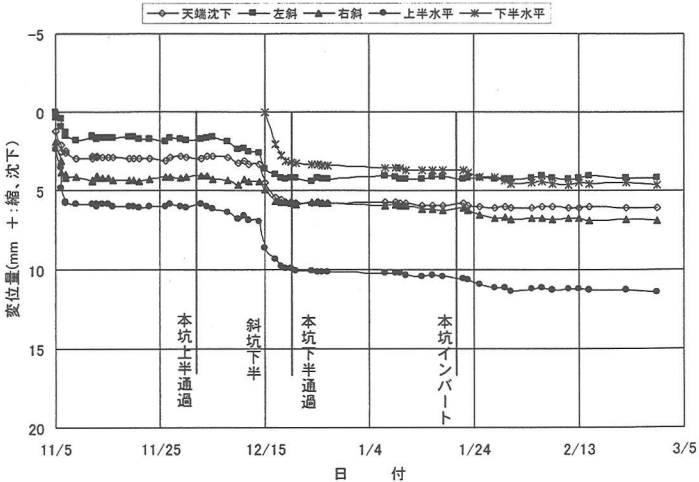
交差部では、複雑な施工手順に伴って複雑な挙動を示すことが予想されたため、地山と支保の挙動の把握および安定性の確認と支保の妥当性の確認のために、日常の計測Aの他に、比較的交差部施工の当初から終了までの状況が把握できる場所を選定し、斜坑側の本坑近傍に計測Bを1断面設けて交点部の計測を実施した（図－1 参照）。図－6～図－8にB計測断面での変位計測、吹付けコンクリート応力、鋼製支保工軸力の経時変化図を示す。また、図－9に鋼製支保工の軸力負担率の経時変化図を示す。

計測結果では、硬岩であるが割れ目が発達している地山に多く見られる特徴的な傾向を示した。すなわち、計測Aでは大きな変位を示さなかった（天端沈下：6.1mm、内空変位11.4mm）ものの、計測Bでは本坑掘削などの施工状況が如実に反映されており、地山や支保部材の挙動を把握することができた。

高強度対応とした吹付けコンクリート応力の最大値は12.4N/mm²を示した。この値は、管理レベルではレベルⅡであるが、

表－3 管理基準値一覧表

	変位計測 (mm)	吹付け応力 (N/mm ²)	鋼支保工軸力 (kN)
注意レベルⅠ	5.0	10.0	700.0
注意レベルⅡ	14.9	20.0	1205.0
注意レベルⅢ	43.9	30.0	1672.0
注意レベルⅣ			
備考	内空変位 天端沈下	設計強度 30N/mm ²	H-150



図－6 内空変位・天端沈下経時変化図

標準の吹付けコンクリート（設計基準強度
18N/mm²）に換算するとレベルⅢになる。

軸力負担率は、下式により求めた。

$$\text{軸力負担率} = \frac{\text{鋼製支保工軸力}}{\text{鋼製支保工軸力} + \text{吹付け軸力}} \quad (2)$$

掘削初期は鋼製支保工の負担が大きく、その後、吹付けコンクリートが主要な支保部材となって、両者の剛性の比から求まる理論上の負担率（17.2%）に近い値に収束する傾向がうかがえる。

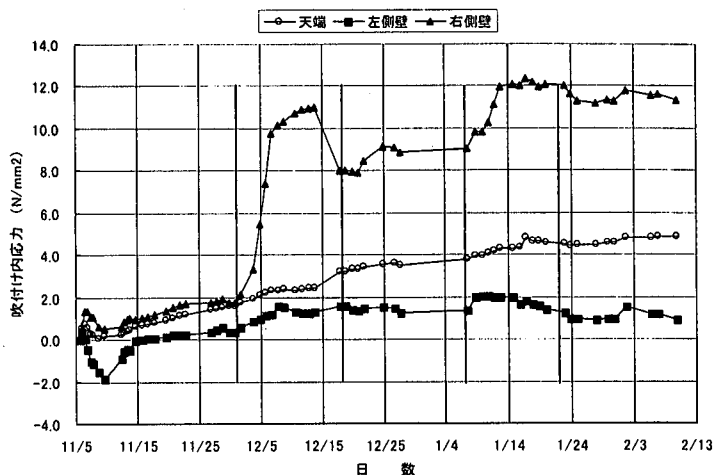
施工中の計測では施工ステップを反映した変位や応力の動きが見られたが、坑内観察では特に支保の変状の発生もなく、構造としては安定した状態で交差部の施工を終えることができた。

表－４ 吹付け硬化後の理論上の
鋼製支保工の軸力負担率

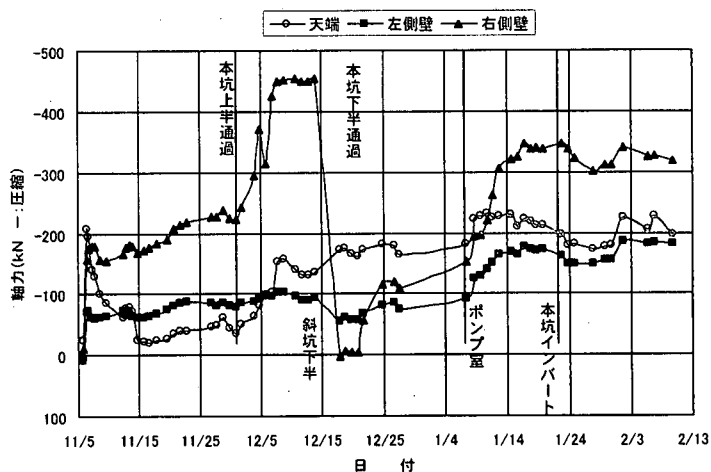
	支 保 部 材	
	吹付け コンクリート	鋼製 支保工
寸法 形状	t=200	H-150
弾性係数 (N/mm ²)	20,000	210,000
断面積 (cm ²)	2,000	39.65
軸剛性 (kN)	4,000,000	832,650
負担率	17.2%	

５．交差部における３次元ＣＧの利用

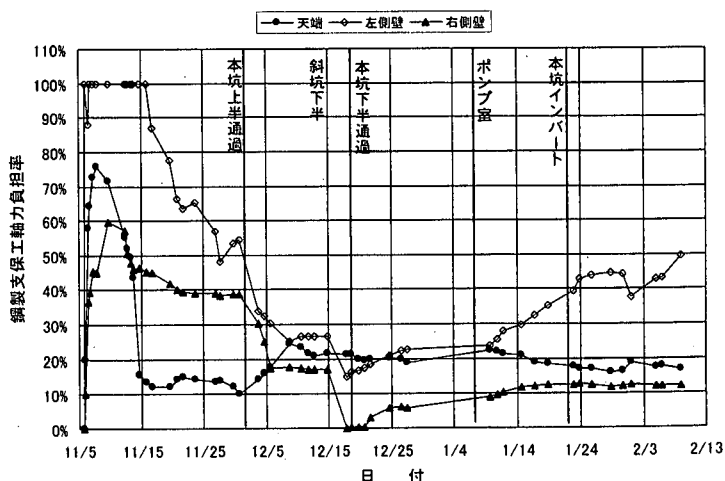
本トンネルの交差部は、様々な施設を複雑な手順で施工するため、特に本坑拡幅部近傍では、位置関係を正確に把握し、設計での支保構造に位置関係から見た合理的な修正を加える必要があった。本トンネル交差部では、３次元 CAD・CG システムを用いて、複雑な構造物を正確にモデリングした後、アニメーションを含むコンピュータ・グラフィックス (CG) でこれらを可視化することによ



図－７ 吹付けコンクリート応力経時変化図



図－８ 鋼製支保工軸力経時変化図



図－９ 鋼製支保工軸力負担率経時変化図

て、設計と施工の円滑な進行を支援した。特に、

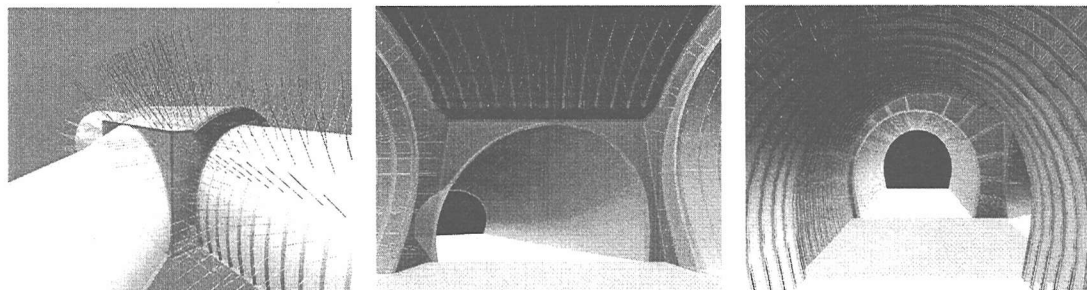
①平面・縦断線形ともに複雑に変化する、斜坑から本坑へのすり付け区間の合理的な設計と施工手順の把握。

②支保工の切断位置の把握や補強部材の設計

③交差部鋭角側のロックボルトの打設角度や打設位置の把握と設計。

④CG アニメーションによる作業員への施工内容説明や作業手順教育への活用
の面でめざましい効果を発揮した。

図－１０に、CAD システムによってモデリングした交差部の支保構造を示す。



図－１０ ３次元 CAD による支保構造のモデリング

６．おわりに

本トンネルの斜坑と本坑との交差部においては、３次元解析を用いた設計と CG による可視化技術を用いて、設計および施工段階の支援に活用してきた。

３次元解析による設計では、検討結果をタイムリーに現場へ反映させることに主眼を置き、比較的簡易な方法（素掘り掘削の弾性解析）で解析した結果、複雑な形状に対しても、補強区間および支保規模の増加量を定量的に設定することができた。

一方、施工中の計測では、複雑な施工手順に伴う地山や支保の挙動がよく反映された結果となった。特に本坑と斜坑が鋭角に交わる部分の特徴的な挙動では、各施工段階で鋼製支保工が有効に作用しており、重要な支保部材として機能していることが把握できた。このような挙動は今後の同種工事の参考になると思われる。また、事前の検討を受けて高強度吹付けコンクリートを採用した結果、計測で確認された応力は、標準の吹付けコンクリートの設計基準強度（ 18N/mm^2 ）ではレベルⅢを示す値であり、交差部では一次支保として十分な安全を確保することが要求されることから、高強度吹付けコンクリート採用の妥当性が確認された。

また、３次元 CAD・CG による可視化技術は、これまで施工中のトンネル工事の分野にはほとんど適用されることがなかったものであるが、今後、建設分野の広い範囲に適用が可能な技術であると考えられる。

本トンネルの交差部では、上述の各種対応により、合理的な支保構造を導入することができたと考えられる。

最後に、今回の交差部の設計・施工にあたり、ご指導・ご協力をいただいた関係各位に、紙面を借りて、厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 先山友康・佐々木裕：青森に延びる新幹線計画，東北新幹線八戸・盛岡間，トンネルと地下，Vol. 29, No. 10, pp. 899-905, 1998.
- 2) 佐々木裕・佐々木幹夫：東北新幹線八甲田トンネル全工区着手，トンネルと地下，Vol. 32, No. 6, pp. 475-483, 2001.