

250 m²を超える超々大断面（集塵機坑）の設計と施工

DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNEL FOR DUST COLLECTOR WITH OVER 250 m² OF CROSS SECTION

村上 孝男¹⁾・山田浩幸²⁾・井上雅人³⁾・向井盛夫⁴⁾・大内浩之⁵⁾

Takao MURAKAMI, Hiroyuki YAMADA, Masato INOUE, Morio MUKAI, Hiroyuki OHUCHI

This project is to construct a tunnel for dust collector with 252m² of cross section by using the top heading & bench cutting method. Based on the data by geological pre-investigations using bore-hole-scope. The excavation of dust collector tunnel was completed with the reinforcement of rock-bolts at the cross-part between the dust collector tunnel and another additional tunnel. It was observed that the stable/unstable condition of supports was under the influence of the cracks at the fracture zone. Therefore, the countermeasure against cracks would be effective.

Key Words: Dust collector tunnel, The large flat-cross section, Reinforcement of cross-part
Proving ahead of tunnel face

1. はじめに

第二名神高速道路の栗東トンネルは片側3車線で掘削断面積が約180 m²、縦横比0.65程度の超大断面トンネルとして計画され、現在 NATM により施工中である。このような大規模の掘削に関しては地下発電所等の良好な岩盤での施工は見られるものの、道路トンネルのような線状構造物としては第二東名・名神高速道路が初めてであり、超大断面トンネルの施工を合理的かつ安全に進めるため、TBM 導坑先進掘削工法や中壁工法(CD)工法が施工されている。

栗東トンネルにおいても西工事はTBM導坑先進工法で施工が進められたが、東工事に関しては、坑口部の地形が急峻でありTBMの転回が困難であるため、上半先進工法が採用されている。

今回、掘削断面積が250 m²を超える集塵機坑および補機室や連絡坑との交差部の施工に関しては、計測管理に基づく情報化施工を行い、無事掘削を完了した。

本報告は集塵機坑ならびに交差部の設計検討と施工時の計測結果から得られた知見について紹介するものである。

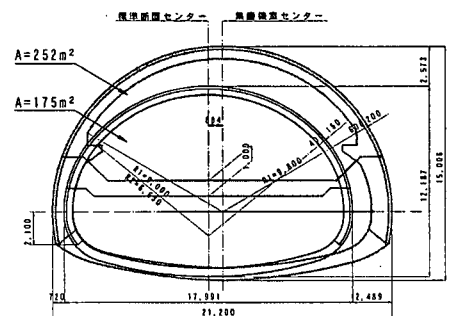
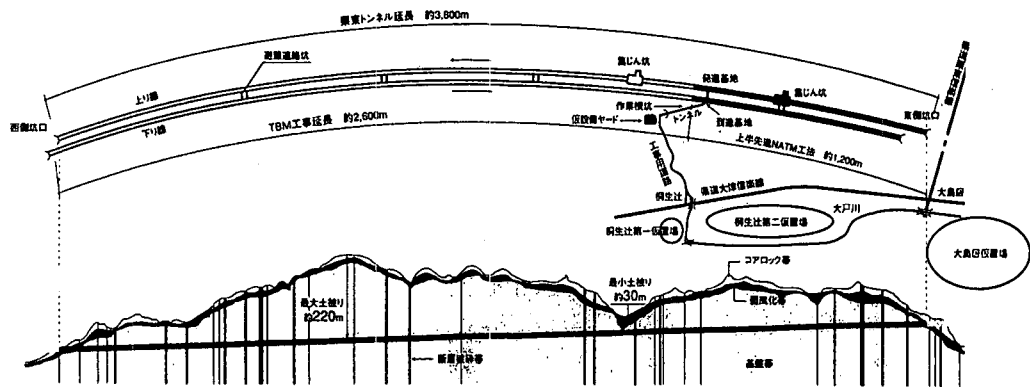


図-1 本坑、集じん機坑標準断面比較図

- 1) (株) 鴻池組 大阪本店 栗東トンネル東工事
- 2) 正会員 (株) 鴻池組 土木設計部 第4グループ(山岳トンネル担当)
- 3) 正会員 (株) 鴻池組 大阪本店 栗東トンネル東工事
- 4) 正会員 日本道路公団 関西支社 大津工事事務所
- 5) 日本道路公団 関西支社 大津工事事務所

2. トンネル概要



図－2 栗東トンネル概要図

2. 1 トンネル工事の概要

栗東トンネルは第二名神高速道路の信楽 IC～大津 IC 間に位置する全長 3.8km の山岳トンネルである。トンネル掘削は作業横坑から東西に上下線 2 車線を掘進したが、東工事ではそのうち作業横坑から東側の上下線約 1.0km を上半先進 NATM により施工している

なお、第二東名・名神高速道路では、このような超大断面を NATM で掘削するために表－1 に示すように支保材料に高規格の材料を採用している。

表－1 第二東名・名神高速道路 高規格支保構造

工 種	従来の規格	新材料の規格	口 的
収付けコンクリート	$\sigma_{100} \approx 18\text{N/mm}^2$ $\sigma_{10} \approx 5\text{N/mm}^2$	$\sigma_{100} \approx 38\text{N/mm}^2$ $\sigma_{10} \approx 10\text{N/mm}^2$ $\sigma_{30} \approx 2\text{N/mm}^2$	・収付けコンクリートを高強度化することで収付け厚さを減らすことが可能 ・初期強度を高くし拘束力を高めることで収付け量の向上が図れる
ブレンコンクリート		高強度高弾性コンクリート	・収付けコンクリートに拘束を持たせることで収付け厚さを更に低減できる ・鋼アーチ支保工を省略できる
鋼アーチ支保工	S5400 引張点強度 345N/mm ² 引張り強度 400N/mm ²	S5400 引張点強度 440N/mm ² 引張り強度 540N/mm ²	・従来の H-2000 支保工より専ら耐力 (引け、軸力) を高規格鋼材 H-2400 で確保することから、軽量化による経済性と施工性の高いこの材料で代わることが可能
ロックボルト	耐力 12～18t	耐力 30～40t	・高耐力化で本数を少なくする。バターンや、図の中みと連動の小径ボルトを対象とする 2 種類のロックボルトを組み合わせたバターンで経済性と施工性ならびに安定性を兼ね備えたものとなる
二次盛土コンクリート	$\sigma_{100} \approx 18\text{N/mm}^2$ ブレンコンクリート	$\sigma_{100} \approx 30\text{N/mm}^2$ SF などの混入	・二次盛土コンクリートを高強度化することで収付け厚さを減らすことが可能 ・鉄筋を鋼繊維補強などに変更することで経済的なものとなる

2. 2 地質・地形概要

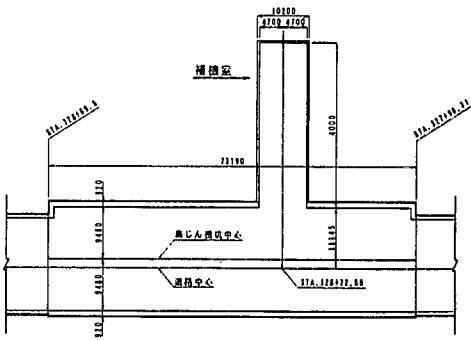
栗東トンネルは、湖南アルプスと呼ばれる信楽山地の北西に位置する金勝山（標高約 567m）の南山麓域に位置している。周辺地山の表層土は流亡・侵食が多く、急斜面では裸地が発達しており、稜線上には数 m もある風化残留核が岩塔状に露頭している。

コアストーンは中生代白亜紀の田上花崗岩で、新鮮で硬質な粗粒黒雲母花崗岩で構成されている。地山弾性波速度は約 5.0km/sec、一軸圧縮強度は約 150N/mm² と非常に硬質な岩盤であるが、軟質な断層破砕帯周辺には、小断層、せん断帯が多く存在し、施工時に突発的な湧水を伴うものもあると予想されていた。

2. 3 集じん機坑の概要

一般的に高速道路の長大トンネルの換気設備は、本坑にループ状のバイパストンネルを掘削してその中に設置する方式が主流であるが、本トンネルにおいては日本で初めて本坑を拡張しトンネル頂部に換気設備を設置する計画がなされている。（区間延長 L=73m）。

したがって、集塵機坑のトンネル掘削断面積は本線部の断面よりさらに大きな断面となり第二東名・名神高速道路の中でも最大の超々大断面トンネルとなる。



図－3 集じん機坑平面図（S.L.盤）

3. 集塵機坑の設計

3. 1 集塵機坑の支保パターン

集塵機坑の設計において、支保パターンに関しては本工事が初めての施工となるため標準的な支保パターンは定められていないが、設計第三集（トンネル）の2車線及び3車線トンネルの標準支保パターンと非常駐車帯の標準支保パターンの関係を参考にして標準支保パターンのほぼ2ランクアップの支保パターンとして設定した。

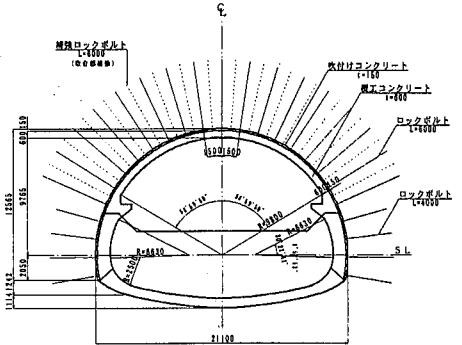
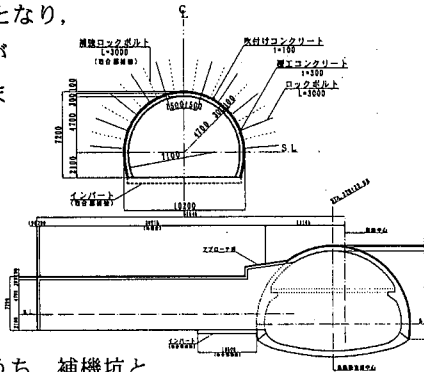
表－2 岩盤状態と土荷重（ゆるみ）高さの関係（標準断面）

岩盤状態	掘削径 B(m)	掘削高 Ht(m)	土荷重の高さ (m)	
			推定式	計算値
2. 堅硬で層状または片岩状のもの	18.0	12.2	$0 \sim 0.5B$	$0 \sim 7.45$
3. 大塊状で普通程度の節理のあるもの			$0 \sim 0.25B$	$0 \sim 4.50$
4. 普通程度に塊状で割れ目のあるもの			$0.25B \sim 0.35(B+Ht)$	$4.50 \sim 10.67$

なお、ロックボルトの長さに関しては標準断面のロックボルト長さが $L=6.0m$ であることをふまえて表－2に示すテルツァギの支保工に作用する土荷重の表を参考に岩盤の状態を「3. 大塊状で普通程度の節理のあるもの」クラスと考え、集塵機坑の掘削径が $B=21.1m(CI)$ であるから

ゆるみ高さは $0 \sim 5.3m$ となり、

最大 $L=8.0m$ のボルトが必要と考えたが、これまでの栗東トンネルでの計測結果をふまえ暫定的にボルト長 $L=6.0m$ （下半 $4.0m$ ）とした。



図－3 交差部支保パターン図(CI)

3. 2 交差部補強工

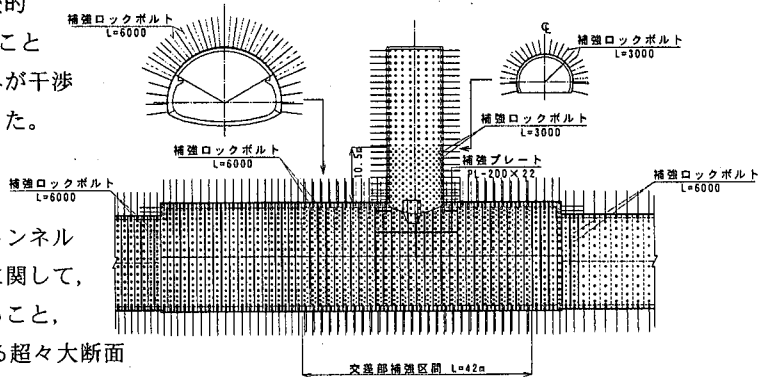
集塵機坑施工区間のうち、補機坑との交差部に関しては超々大断面に比較的大きな補機坑（ $A=64m$ ）が交差することとなり、それぞれの掘削によるゆるみが干渉して大きなゆるみを生じる懸念があった。

交差部の補強に関しては、これまでも長大トンネルにおける集塵機坑の交差部での検討事例もあり、本トンネルの場合、集塵機坑と補機坑の交差部に関して、地山等級が概ねCI相当と良好であること、集塵機坑掘削断面積が $250m^2$ を超える超々大断面であること、交差角度が 90° で交差することを考慮して交差部補強工の方針を以下のとおり定めた。

- ① 交差部補強範囲は補機坑交差位置を中心として $4.2m$ （前後 $1D:45^\circ$ 範囲）とする。
- ② 支保パターンに関しては鋼製支保工、ロックボルトは集塵機坑の支保パターンと同様とするが、吹付コンクリートに関しては靱性の大きな鋼繊維補強コンクリート（SFRC）を採用する。
- ③ 掘削時のゆるみ抑制対策として補強ボルト（ $L=6.0m$ ）を天端 120° 範囲に打設し吊り下げ効果を図る。

なお、補機坑側に関しても $1D$ 区間は補強ボルトを打設する計画とした。

- ④ 鋼製支保工を切断する部分は補強プレートとロックボルトにより応力集中の抑制を図る。
- ⑤ 計測工B（地中変位、ロックボルト軸力等）を実施し、情報化施工を行うとともに、支保構造ならびに補強対策の検証を行う。



図－4 交差部補強工展開図

4. 集塵機坑の施工

4. 1 切羽前方探査

本トンネルの集じん機坑のような超々大断面を掘削する際には、事前に前方地質状況を把握することにより的確な支保パターンを選定を行うことが施工時の安全確保のためには重要である。西工事ではTBM先進導坑で施工を行っているため、本坑掘削前に全線にわたり地質情報が得られ、そのデータに基づく拡張工事が進められた。

しかしながら、東工事では上半先進工法を採用しているため、事前の地質情報としては当初の地質調査のデータしかなく、詳細な地質情報を得る必要があった。

そこで、切羽面から前方探査を実施することにより前方地質状況を推定した。

前方探査では、削孔時間や削孔水の色、くり粉（岩盤の削りかす）の性状

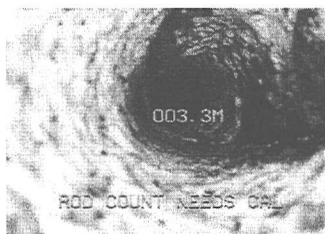
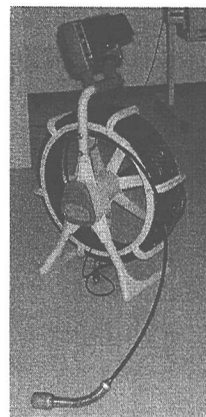
等を観察し、その後、ボーリング孔内にボアホールカメラ（写真－1）を

挿入して孔内の状況をビデオカメラに撮影した。（写真－2）事務所に

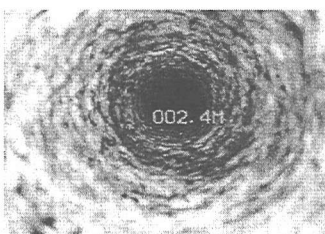
写真－1 ボアホールカメラ

において、得られた画像前方データから孔内の亀裂の大きさと方向、断層や破碎帯の位置を読みとり、平面図上にプロットして前方地山の推定地質図を作成した。

また、湧水箇所や亀裂の状況についても把握することができた。今回実施したボアホールカメラによる前方探査結果により、破碎帯の位置や連続性、ならびに湧水箇所の特長等が直接画像データとして得られ評価できたことは、施工時に大変参考となった。

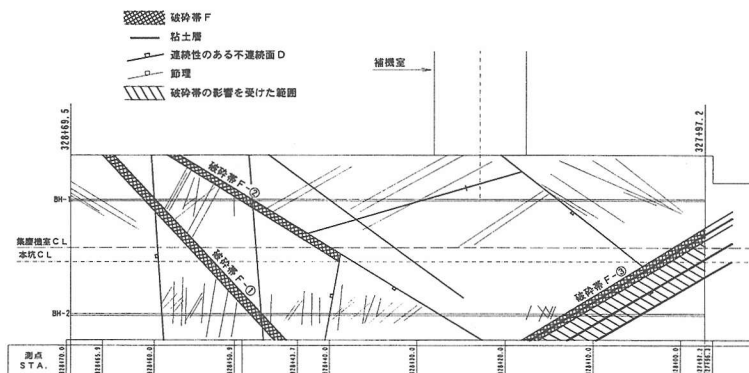


節理部

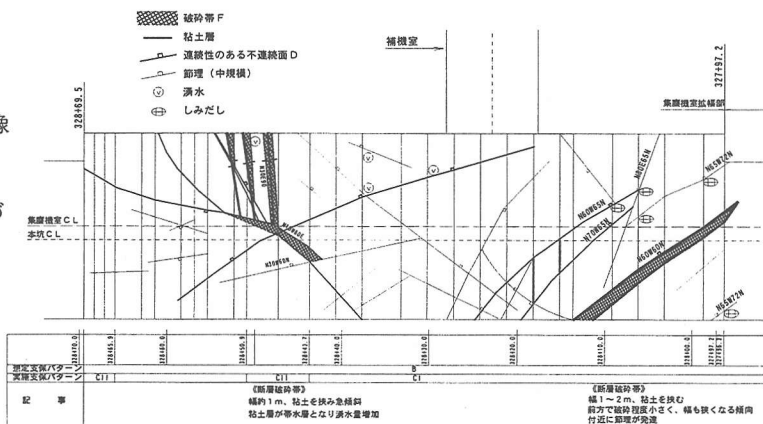


変質部

写真－2 ボアホールカメラ映像



図－5 推定地質平面図（前方探査結果に基づく）



図－6 地質平面図（切羽観察結果に基づく）

図－5、6に前方探査結果に基づく推定地質平面図と施工時の切羽観察に基づく地質平面図を示すが、推定された地質に比べて破碎帯の方向性や連続性が若干異なっていたものの、破碎帯の位置や規模は概ねよく一致しており、有効性が確認できた。

4. 2 集塵機坑の施工

大断面硬岩掘削にあたっては、施工速度を早めるため発破の効率を上げるなど効率的な掘削方法を選定することが重要となる。また、集じん機坑の始点となる本坑から集じん機坑への拡幅部の施工方法についても、拡幅量がかなり大きくなるため慎重に検討して施工を進める必要があった。

一方、このような超々大断面において一旦地山のゆるみを大きく許した場合、その対策工が非常に大規模なものとなると考えられたため、切羽前方探査による地質状況を分析して適切な支保を選択しながら施工を実施した。

図-7に施工順序図を示すが、集じん機坑の施工は、上半掘削、下半掘削、盤下げインパートコンクリート打設、覆工コンクリート打設の順で実施した。

掘削サイクルの中で削孔と吹付けに相当な時間を要することが予測されたため、当工事では大断面であることの利点を生かし、削孔時にはジャンボ2台(写真-3)、吹付け時には吹付機2台を使用して施工速度を早めることにした。

また、硬岩地山を効率よく掘削するために、発破方式についても改善を行った。

通常の発破作業においては、火薬と雷管を、含水爆薬+電気雷管の組み合わせで使用するが、硬岩地山に対して発破効率が悪く(当たりが出やすく)、加えて大断面であることを考えれば、装薬作業に時間を要するなどの短所があった。

そこで火薬に密充填が可能なAn-Fo

を採用し、雷管は静電気等に対し安全な

非電気式雷管を採用することで、装薬作業を効率化し安全性も改善することができた。

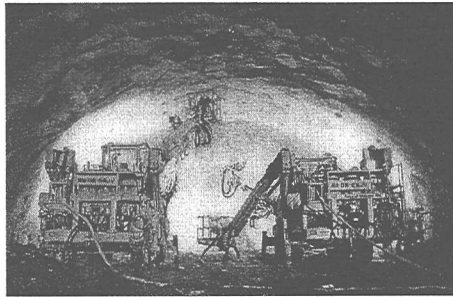


写真-3 施工状況

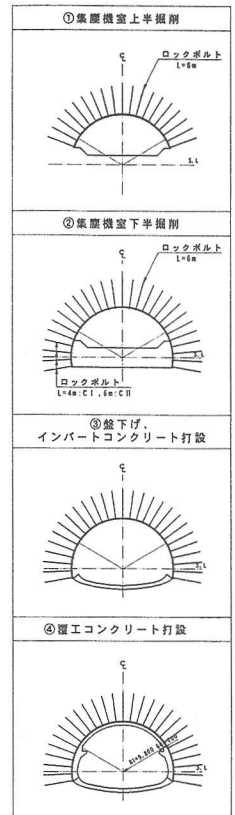


図-7 施工順序図

5. 計測結果と設計の検証

施工時の計測結果に基づき、今回施工した集塵機坑ならびに補機坑交差部に関する設計の検証を行った。

5. 1 破碎帯部の施工

図-10にF-①、F-②破碎帯部(STA.328+55.4)における天端沈下および内空変位の経時変化図を示す。

内空変位は上半掘削時には左側斜測線(D1)がさほど変位しないのに対して、右側斜測線(D2)は5mm程度変位しており、切羽観察時に見られた破碎帯(亀裂)の影響を受けて局所的に偏圧を受けた影響が伺える。

全体的には天端沈下が内空変位に比べて卓越する変形モードを示しており、偏平断面の影響が大きかったものと判断される。(上半縦横比0.40)

下半掘削時には偏平率が改善されることもあり、内空水平測線が縮み本来の挙動への移行が見られたが、

依然として偏圧傾向が見られ、事前の地山状況の推定が重要であることが再確認された。(下半縦横比0.59)

表-3 発破方式の比較

	含水爆薬+電気雷管 (従来方式)	An-Fo+非電気式雷管 (今回採用した発破方式)
長所	くり当てに対して敏感で安全 耐水性に優れる 後ガスが少ない 雷管一個当たりの単価が安い 観望作業が容易	装薬量の圧縮 結露防止効果 An-Foの密充填により孔数削減 電気雷管の耐水性に対して安全 火薬コストの低減
短所	電気の危険がある 硬岩地山では発破効率が低い 観望作業が難しい	電気雷管に比べ高価 観望作業が困難 後ガスの悪化

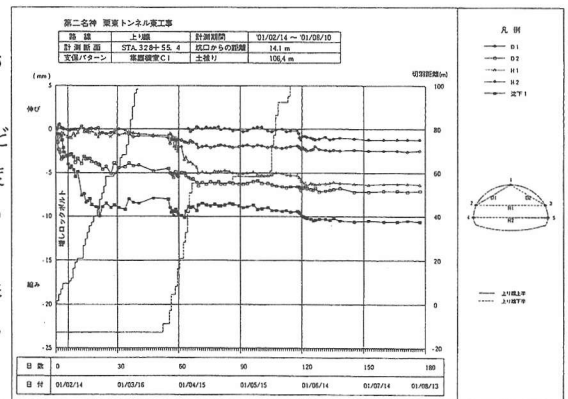


図-8 内空変位・天端沈下経時変化図(破碎帯)

図-9にF-①、F-②破碎帯部（STA.328+56.0）における計測工Bの結果（地中変位分布図）を示す。

地中変位分布より、掘削によるゆるみ領域の範囲は3～4mでボルト長を6mとしたことは妥当であったことが確認された。

ロックボルト軸力に関しては、上半掘削時に亀裂の影響で左肩部のボルト（R2）で16.3ton（下半掘削時16.6ton）と大きな軸力が発生し、部分的な増しロックボルトを打設したが、対応後は速やかに収束に至った。

5. 2 補機室交差部

補機室交差部（STA.328+22.7）における天端沈下・内空変位は地質が良好なこともあり偏圧の傾向は見られなかったが、偏平断面の変位挙動を示していた。

図-10に示す補機室交差部（STA.328+22.38）における地中変位分布より、掘削によるゆるみ領域の範囲は2～4mであると確認され、交差部施工に伴う補強ロックボルトの長さは6mで妥当であったと判断できる。また、ロックボルト軸力に関しては、上半掘削時に亀裂位置の右肩部のボルト（R3）で23.5tonの軸力が発生し、下半掘削時にも、右肩部のボルト（R4）で21ton、右側壁部（R5）でも15tonと大きな軸力が発生したため、対策工として下半増しロックボルトを打設して対応した。

この断面の右側には前方探査や切羽観察により破碎帯F-③の存在が確認されており、今回の計測結果から、硬岩地山においては亀裂等の影響が支保の安定に大きく影響を与えることが確認された。

6. まとめ

道路トンネルとしては前例のない断面積252㎡の超々大断面トンネルを掘削するにあたり、前方地質推定を行い、計測結果を速やかに施工に反映させる情報化施工より無事集じん機坑の施工を完了することができた。また、集じん機坑と補機坑の交差部補強工に関して地中変位計測結果から補強ボルト長（6m）が適切であったことが確認できた。

トンネルの変位挙動は、トンネル形状が偏平であることから上半掘削時に天端沈下が卓越する変形モードが見られ、破碎帯部では偏圧を受け、トンネルが左右でアンバランスに変形するような傾向も確認された。地山を的確に把握し、特に亀裂の位置、破碎状況に合わせて適切な支保設計を実施すれば250㎡を超える超々大断面であっても標準支保設計の延長上で施工が可能であることが検証されたと考える。

今後、大断面、硬岩掘削といった同種トンネル工事において、何かの参考になれば幸いである。

最後に、本工事の設計・施工にあたり、栗東トンネル大断面トンネル支保構造に関する評価検討委員会において各委員の方々に様々なご議論いただき、貴重なご意見を伺いましたことに深く感謝の意を表します。

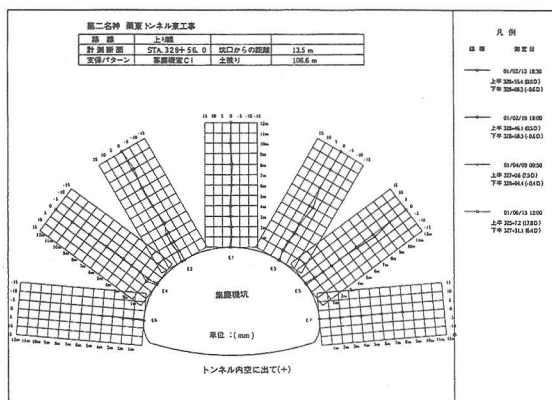


図-9 地中変位分布図（F-①、F-②破碎帯部）

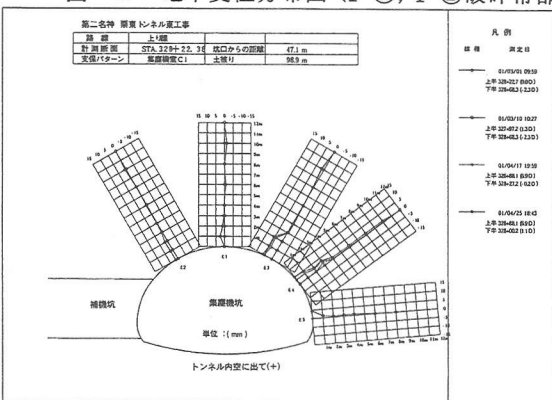


図-10 地中変位分布図（補機坑交差部）

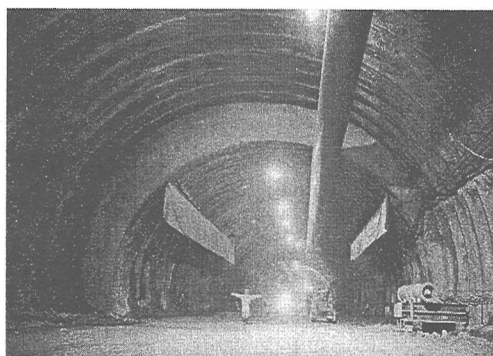


写真-4 集じん機坑全景