

## 2.2.5 鷲羽山トンネル

### (1) 工事概要<sup>1)、2)、3)</sup>

鷲羽山トンネルは、本州四国連絡橋児島 - 坂出ルートのおお中央にあり、道路鉄道共用部の始点に位置している(図-1)。トンネル構造としては、上段に道路1種2級の上下線2本、下段に新幹線用と在来線(甲種)用2本の2段双設トンネル形状となっている(図-2)。こうした構造物形状の特殊性や、それに起因する施工過程の複雑さのために、工事の安全性や経済性が過去の経験的要素の統合だけでは、十分に確保しきれないというむずかしさを含むことになり、現場計測を援用し、その計測結果を設計・施工へフィードバックすることが不可欠とされた。このような経緯から、本トンネル工事は逆解析が本格的に導入された記念碑的工事でもある。

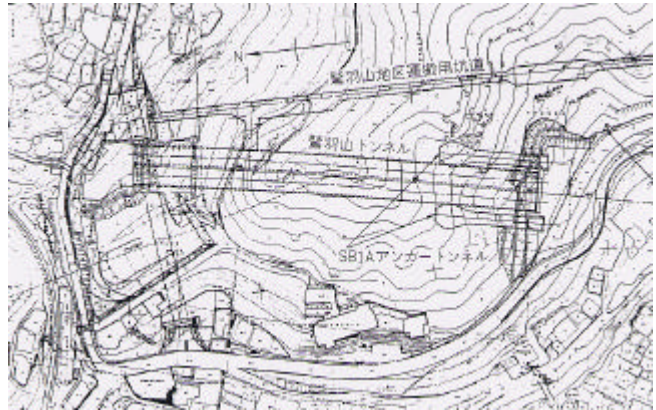


図-1 鷲羽山トンネル路線図

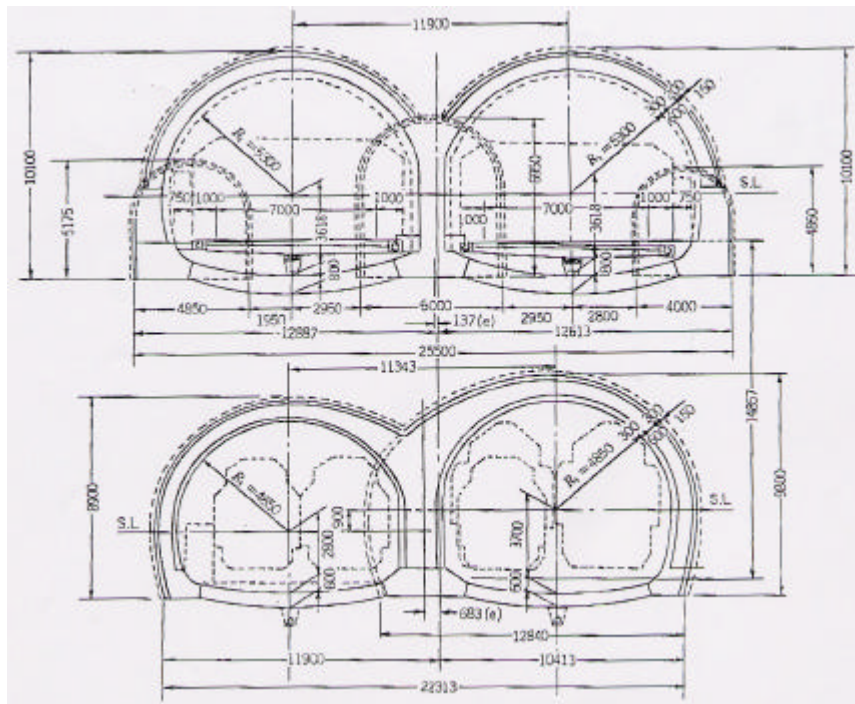


図-2 鷲羽山トンネル設計断面図

### (2) 地質概要<sup>2)</sup>

当該トンネルの岩盤は、花崗岩、閃緑岩、花崗閃緑岩より構成されている(図-3)。花崗岩は、ほぼトンネル全長にわたって分布しており、閃緑岩は中央部、花崗閃緑岩は北坑口付近に多くみられた。また両坑口付近には、風化がかなり進んだ岩級区分D層が、さらに中央部に近づくにつれてCH層がみられ、おおむね西側トンネルに比べ東側トンネルの地質が悪かった。さらに岩盤はブロック状であり、全般に亀裂が多く開口状のものも多くみられたが切羽は自立し、切羽の崩壊などの施工上の問題は発生しなかった。またCL層、D層には10~20mm程度の粘土の狭在する亀裂が多くみられた。

これらの亀裂は、走向が $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$ のものが卓越してトンネル軸に対して直交傾向を持っており、傾斜はほぼ $90^{\circ}$ （鉛直）に近い。また湧水はほとんどなく、断層も認められなかった。鉄道トンネルでの地質では、STA249+30 付近がもっとも悪く、亀裂が多く発達し風化した花南閃緑岩が主要を占め、計測結果からも内空変位や天端沈下などが一番大きく計測されている。地表沈下測定においてもSTA249+30が他の断面に比べ比較的大きな値を示している。一方、土被りの一番大きいSTA248+60では、おもに閃緑岩が主要を占めC層と岩が固く、地表ではSTA249+30とは反対に、わずかであるが、隆起が見られ地山の側圧がもっとも大きいと考えられる。

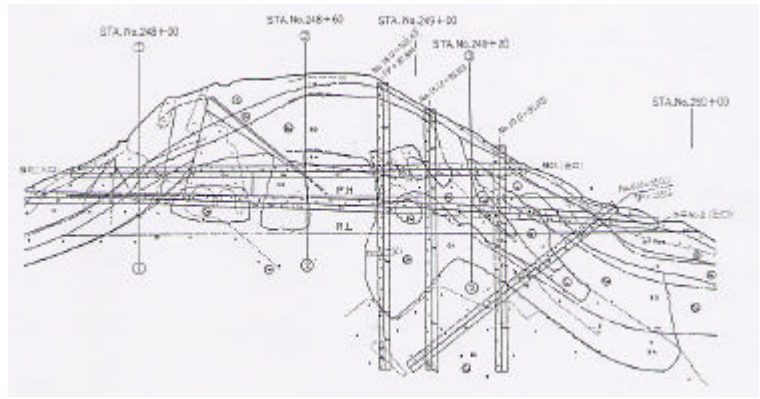


図-3 鷲羽山トンネル路線中心地質縦断面図

(3)施工概要<sup>1)、2)</sup>

施工手順は、力学的安定性・施工性、経済性などの各側面からの検討結果を踏まえ、下段の鉄道トンネルの掘削および覆工完了後、上段の道路トンネル施工を行うことにした。このうち、鉄道トンネルは昭和57年10月21日に着手し、昭和60年2月23日に覆工エコンクリートの打設が完了した。また、道路トンネルは61年1月に開通した。以下、それぞれの施工概要を示す。

A. 鉄道トンネルの施工概要

本工事は、4本のトンネルをきわめて近接して施工するため、掘削による地山の損傷を極力おさえ、トンネル相互間の悪影響をできるだけ低減することなどの考えから、全線NATMを採用した。その施工の形態および過程は、大別して中央部と坑口部にわけられる。まず、南北両坑口については、掘削を開始する前に、以下の点を考慮して、パイプルーフ工（北坑口L=40m、南坑口L=35m）を施工した。

- 通常のトンネル同様、土かぶり薄く地形の影響で偏圧を受けやすい
- 地表面からの風化の進展が著しい。
- 法面の安定が問題になる

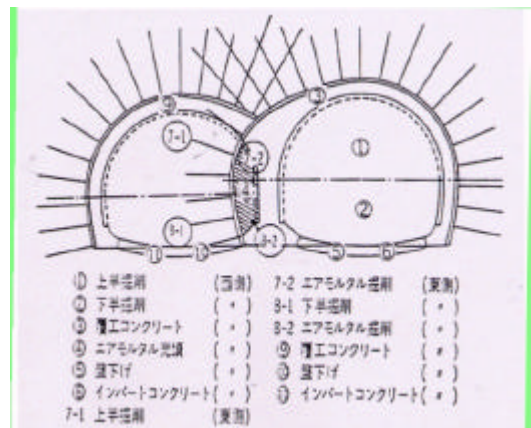


図-4 鉄道トンネル坑口部施工順序図

また同じ区間に、鉄道トンネル上部の地盤補強のため注入も合わせて実施した。上記補強工を施工した後、トンネル脚部の補強安定化などをはかるため、同区間の掘削方式を側壁導坑方式として掘削施工した・施工順序を図-4に示す。

次にトンネル中央部については、当初中央導坑を先行させ、中央隔壁コンクリートを施工した後、上部半断面先進ショートベンチカット工法による本体掘削を行う計画であった。しかし、その後委員会などで検討した結果、

施工の単純化、工程の短縮、経済性などを考慮し、在来線（東側）トンネルの一部をだき込む形で、新幹線（西側）トンネルを掘削し、新幹線側の全断面覆工コンクリート（中央隔壁コンクリートを含む）を完成させた後、在来線側を施工することにした。図-5に中央部の施工順序を示す。なお、覆工コンクリートには、D19の異形鉄筋を20cmピッチに上・下線2段に配新しているほか、地山と覆工の縁を切り、覆工コンクリートのクラック発生防止のために覆工コンクリートに緩衝材（長繊維不織布）を取り付けている。

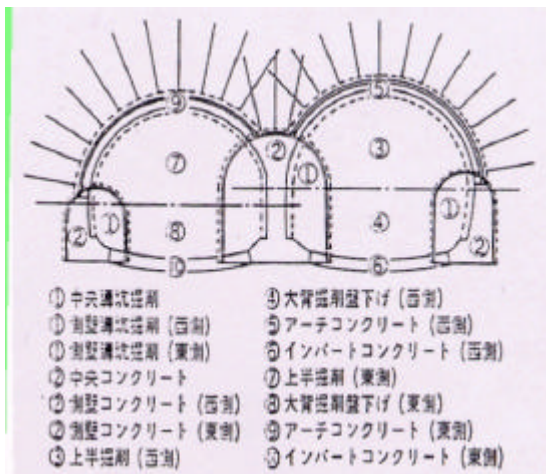


図-5 鉄道トンネル中央部施工順序図

### B. センターピラー部補強の概要<sup>2)</sup>

当初、鉄道トンネルと道路トンネルとの中間岩盤補強工として、長尺ロックボルト工を設計していたが、トンネルの安定解析結果などから、道路トンネル掘削時、鉄道トンネルに上方への引張りが生じ、委員会でこの長尺ロックボルト工は、上方への引張りの現象を助長することになるという討議がされており、その後、補強工についてグラウト工で施工するよう変更がなされた。グラウトの施工について、以下に要領を示す。

注入系統：ソレタソシュ工法による1液1系統方式

1孔の注入順序：下部（口元）より上部（先端）へ前進する前進式ステップ注入方法。

全体の注入順序：トンネル横断方向の同時注入。

孔間隔：縦断方向に2mピッチ、横断方向には覆工背面2m奥にて2mピッチ

注入ステップ間隔：33cmピッチ（3ステップ/1m）

吐出量：6ℓ/分前後

材料：覆工背面部=普通セメントミルク（W/C=160%、中間岩盤部=超微粒子セメントミルク（商品名：アロフィクスMC1号）

圧力管理：覆工背面から2m以内の岩盤 $P_{max} = 5 \text{ kg/cm}^2$ 、2m以奥や岩盤 $P_{max} = 9.5 \text{ kg/cm}^2$

計画注入量：注入対象地山量の7.3%（平均）

覆工影響調査：トンネル方向に平均20mピッチに東西トンネル断面にカールソン鉄筋計、コンクリート有効応力計、ストレインゲージにて各計測管理値を設定して影響調査を行う。

以上の要領により施工した結果は、注入対象地山量の8%（CM 120m<sup>3</sup>、MC1号 1,840m<sup>3</sup>）を注入し、鉄道トンネルの覆工にも悪影響を及ぼすことなく無事計画どおり注入できた。

### C. 道路トンネル施工の概要<sup>3)</sup>

道路トンネルの施工手順の選定にあたっては、上部半断面先進ショートベンチチカット工法と3線導坑先進工法を比較検討し、下記の理由により3線導坑先進工法とした。すなわち、



道階トンネルの施工位置が地表面に近くなり(最大土被り30mm)、風化も進み地質も軟弱化している。また、道路トンネル中央部天端に本トンネルの地質調査に使用した調査坑があり、トンネル掘削以前にコンクリートで埋め戻したが、調査坑周辺の地山の緩み、および中詰コンクリート周式部には空洞が残っていることが考えられ、中央導坑を掘削してセンターピラー打設して地山の変位を拘束することにより、施工の安全性を高くすることができる。

センターピラーで上部の変位を拘束し、さらに側壁導坑および連絡坑を利用することにより上半・下半を坑内から坑外へと掘進することができ、坑口付近の軟弱部分の安定を図れるとともに、複数の作業箇所を設けることができる。

調査坑周辺部の崩落など、不測の事態においても規模を極力小さくするとともに、対応策を臨機応変にとることができる。

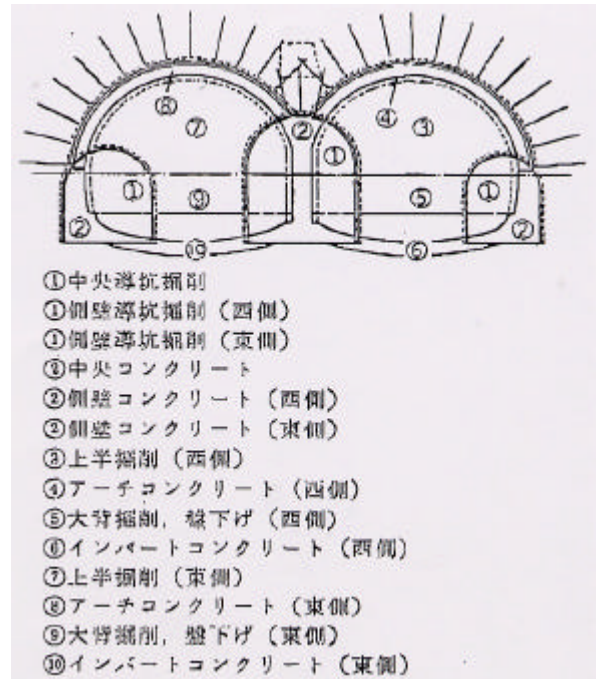


図-6 道路トンネル施工順序図

施工手順は図-6に示すように、中央および東西両側壁導坑を掘削し、それと並行して中央および西側導坑の隔壁コンクリートを打設する。東側導坑と導坑間に設けられた3本の連絡坑を掘削、ずり出し、および覆工コンクリート打設の運搬路として利用する。連絡坑より西側本坑トンネルを坑内から坑外へ向けて掘削し、覆工コンクリートを打設する。西側本坑と並行して東側導坑の側壁コンクリートを打設し、東側本坑トンネルも西側と同じ手順で施工した。

(4) 計測と逆解析の概要<sup>4)、5)、6)</sup>

当該トンネルにおいては、変位の計測結果を基に種々の目的で逆解析が実施された。その、主たる目的は以下のようなものである。

鉄道トンネル掘削時の計測変位を用いた逆解析を実施し、その逆解析結果からトンネル周辺地山の最大せん断ひずみ分布を求め、鉄道トンネルの健全性を検証するとともに、道路トンネル掘削へ及ぼす影響を評価する。

鉄道トンネル掘削時の逆解析結果を利用して、道路トンネル導坑掘削時の変位挙動およびトンネル周辺地山の最大せん断ひずみ分布の予測を行なう。

道路トンネル導坑掘削時の計測変位を用いた逆解析を実施し、その逆解析結果からトンネル周辺地山の最大せん断ひずみ分布を求め、道路トンネル周辺地山の健全性を検証するとともに、予測値との比較を行い、力学モデルの妥当性を検証する。

鉄道トンネル、および道路トンネル導坑掘削時の逆解析結果を利用して、西側道路トンネル上・

下半、および東側道路トンネル上・下半導坑掘削時の変位挙動およびトンネル周辺地山の最大せん断ひずみ分布の予測を行なう。

西側道路トンネル上・下半、および東側道路トンネル上・下半導坑掘削時の変位計測結果を用いた逆解析を実施し、その逆解析結果からトンネル周辺地山の最大せん断ひずみ分布を求め、鷲羽山トンネルの長期的な健全性を評価する。

図-7に現場計測断面と各断面における計測項目の一覧を示し、図-8には典型的な計測断面内の変位計測計器配置を示す。

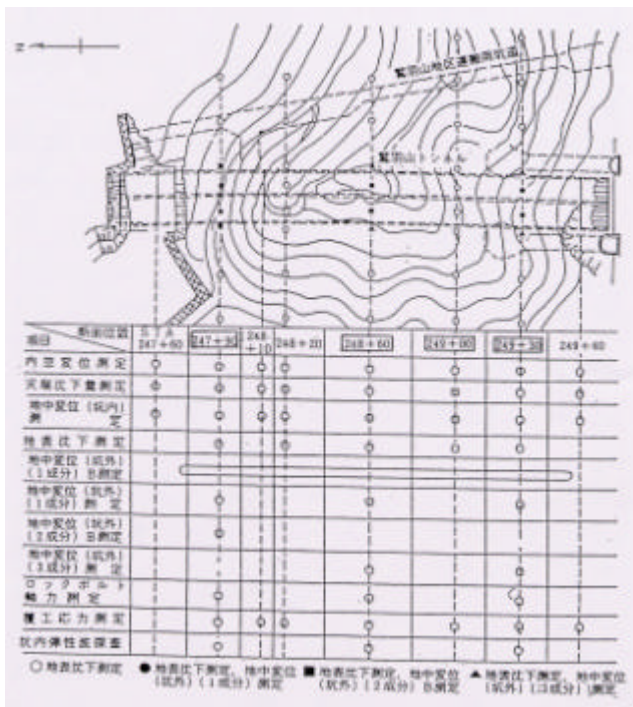


図-7 計測断面と各断面の計測項目一覧

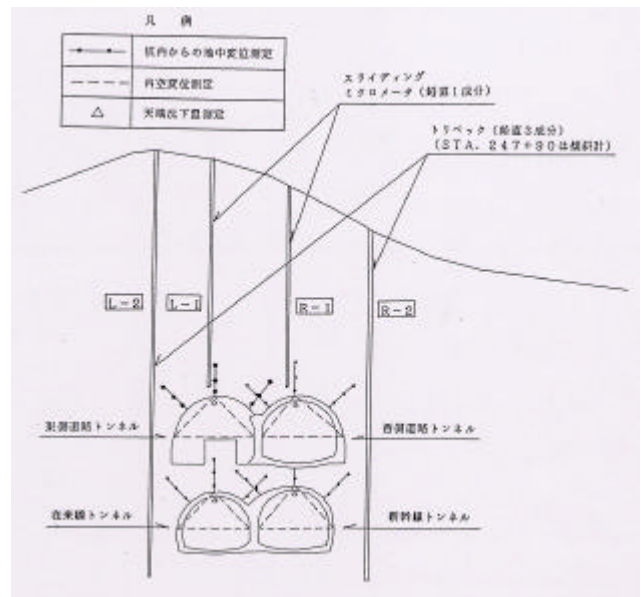


図-8 計測断面内の変位計測機器配置

図-7、8に示すように当該トンネル工事では比較的短い距離に多くの計測断面が配され、かつ各断面における計測項目、計測点数とも多岐にわたる。これと、トンネル構造および施工過程が著しく複雑なこともあり、前述の逆解析作業と、それを基にしたフィードバック作業の実際は非常に煩雑で複雑なものとなった。このため、その成果のいくつかを取り出して個別に説明することは難しいが、当該トンネルの逆解析業務では上・下二段でかつそれぞれがめがねトンネルという特殊性から、先に掘削されたトンネルによる地山の緩みや初期応力状態の変化が非常に重要視された。このため、逆解析によって同定する初期応力パラメータを次のように定義した。すなわち、

$$\left\{ \frac{\mathbf{s}_0^*}{E} \right\} = \left\{ \frac{\mathbf{s}_0}{E} \right\} + \left\{ \Delta \frac{\mathbf{s}_0}{E} \right\} \{\mathbf{a}\}^T \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで、

$$\left\{ \frac{\mathbf{s}_0^*}{E} \right\}^T = \left\{ \frac{\mathbf{s}_{x0}^*}{E} \quad \frac{\mathbf{s}_{y0}^*}{E} \quad \frac{\mathbf{t}_{xy0}^*}{E} \right\}^T \quad : \text{近傍トンネル掘削による岩盤の損傷を考慮した初期応力パラメータ}$$

$$\left\{ \frac{\mathbf{s}_0}{E} \right\}^T = \left\{ \frac{\mathbf{s}_{x0}}{E} \quad \frac{\mathbf{s}_{y0}}{E} \quad \frac{\mathbf{t}_{xy0}}{E} \right\}^T \quad : \text{地山初期応力状態に依存する初期応力パラメータ}$$

$$\left\{ \Delta \frac{\mathbf{s}_0}{E} \right\}^T = \left\{ \Delta \frac{\mathbf{s}_{x0}}{E} \quad \Delta \frac{\mathbf{s}_{y0}}{E} \quad \Delta \frac{\mathbf{t}_{xy0}}{E} \right\}^T \quad : \text{当該トンネル掘削による初期応力パラメータの増分}$$

$$\{\mathbf{a}\}^T = \{\mathbf{a}_{xx} \quad \mathbf{a}_{yy} \quad \mathbf{a}_{xy}\}^T \quad : \text{未知の係数ベクトル}$$

式(1)において $\{\mathbf{s}_0/E\}$ は地山本来の変形特性と初期応力状態によって決定される初期応力パラメータであり、具体的には新幹線トンネル掘削時の計測変位から同定される初期応力パラメータである。また、 $\{\Delta\mathbf{s}_0/E\}$ は新幹線トンネル掘削による初期応力パラメータの増分を表すものである。したがって、ここではトンネル掘削による地山の損傷や応力状態の変化をひずみ成分として評価することを試みた。なお、 $\{\mathbf{a}\}$ は地山が完全な弾性体であれば $\mathbf{a}_i = 1$ となるが、地山挙動の非線形化や緩みの発生などに依存してその値は変化するものとして導入したパラメータであり、やはり逆解析によって同定すべきパラメータとした。このように、近傍トンネルによる岩盤損傷を考慮して求めた初期応力パラメータを用いて推定したSTA. 248+60断面の地山周辺岩盤の最大せん断ひずみ分布の経過を図-9～12に示す。

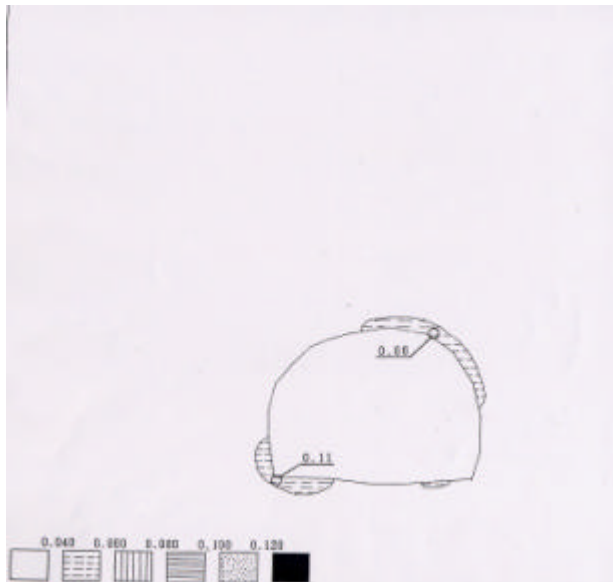


図-9 新幹線トンネル掘削後の最大せん断ひずみ分布

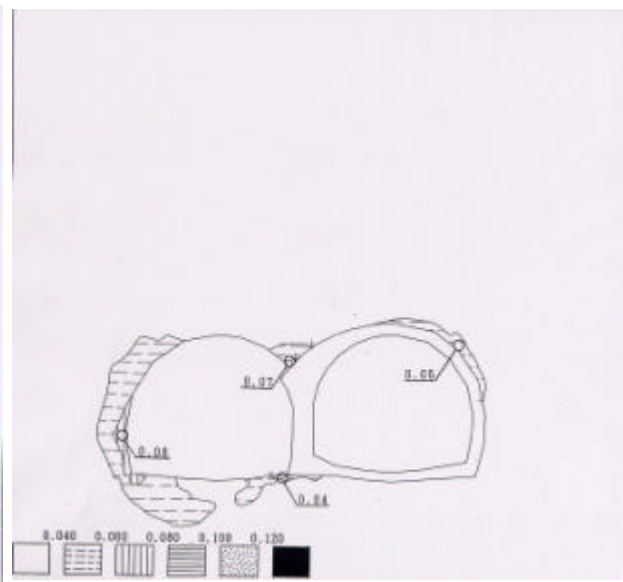


図-10 在来線トンネル掘削後の最大せん断ひずみ分布

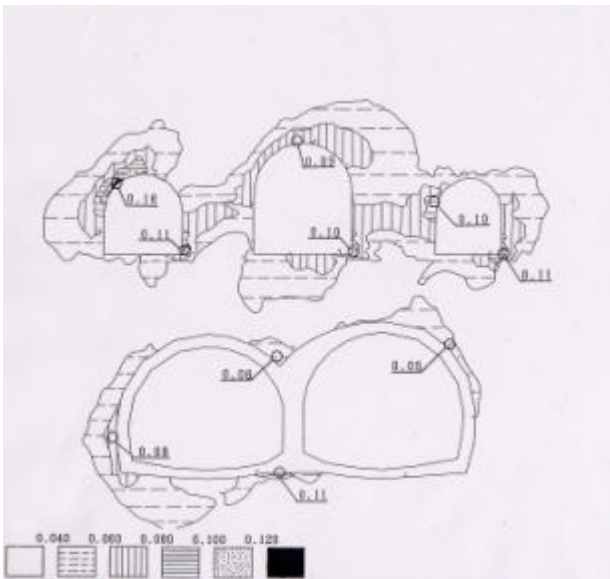


図-11 道路トンネル導坑掘削後の最大せん断ひずみ分布

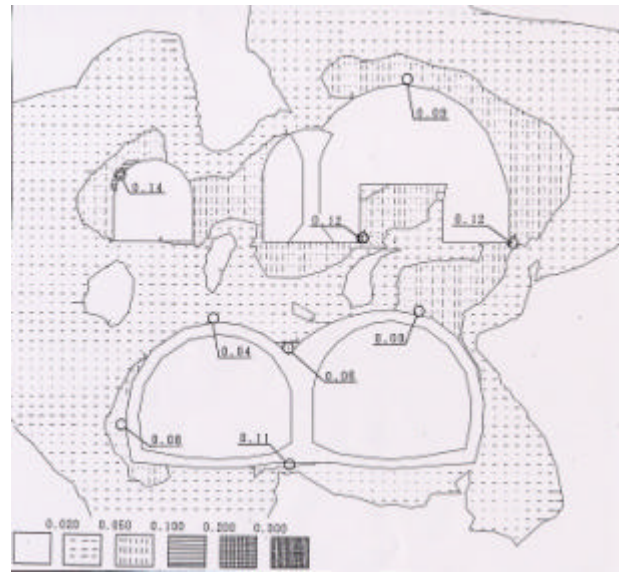


図-12 西側道路トンネル上半掘削後の最大せん断ひずみ分布

参考文献

- 1) 大島重利、岡本伸一：鷲羽山トンネルの施工(1) 鉄道トンネルの計測、トンネルと地下、Vol. 15, No. 4, pp. 19 - 31, 1984. 4
- 2) 長谷川滋、佐藤正人、岡本伸一：鷲羽山トンネルの施工(2) 鉄道トンネルの計測結果、トンネルと地下、Vol. 16, No. 10, pp. 7 - 14, 1985. 10
- 3) 植田正弘、伊藤稔明、岡本伸一：鷲羽山トンネルの施工(3) 道路トンネルの施工と計測結果、トンネルと地下、Vol. 18, No. 6, pp. 35 - 42, 1987. 6
- 4) 櫻井春輔、森誠一郎、山地宏志：昭和60年度鷲羽山トンネル挙動解析報告書、(財)建設工学研究所、1985. 3
- 5) 櫻井春輔、森誠一郎：昭和61年度鷲羽山トンネル挙動解析報告書、(財)建設工学研究所、1986. 3
- 6) 櫻井春輔、森誠一郎：昭和62年度鷲羽山トンネル挙動解析報告書、(財)建設工学研究所、1987. 3