

大断面トンネルの分割施工と継手の研究

A Study of Building a Large Tunnel by Small Shields

金子研一¹・小柳善郎²・福田宏之³・中井 学・鈴木 聡³

Kenichi Kaneko, Yoshirou Koyanagi, Hiroyuki Fukuda, Manabu Nakai and Akira Suzuki

¹正会員 工博 大成建設株式会社 土木技術開発部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

E-mail:kaneken@kiku.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

³正会員 大成・青木あすなろ・不動・松村 J V (〒537-0021 大阪市東成区東中本 1-13-9)

This method is used when a tunnel is constructed at a Large Tunnel. First the sections are divided and each section is excavated individually. Then a reinforced concrete tunnel is constructed inside of steel segment. When this steel segment is valued not as a provisional construction but as an ultimate one, the expenses can be reduced.

The feature of this method is that there would be a space of some centimeters between the two tunnels, which are next to each other. We took off the Joint and did a stretching experiment. On this paper, the result of the experiment, and the example, which we have used this method on a subway construction are stated.

Key Words: underpass, a traffic jam, an interchange, the shield driving method

1. はじめに

「都市再生」が目指す目標の一つに「交通渋滞の解消」があげられる。平成15年度の国土交通白書によれば、全国に1000箇所あるといわれている開かずの踏切と、その倍以上の交通渋滞の激しい交差点があり、渋滞緩和対策としての土木事業が行われることが期待される。

これらの解決策としての立体交差は、オーバークロスよりアンダーパスで計画されることが多い。アンダーパスの特徴として、トンネル断面は矩形であり、大断面である。そして道路の地下浅い部分に建設され、距離が短いことがあげられる。このようなトンネルをシールドで掘削しようとする、機械費の工事費に占める割合は大きくなり、工事費が高いものになる。また、土被りが小さい軌道直下に建設するため、大断面のシールドでは軌道に与える影響が大きいことが予想される。

そこで大断面を分割して、シールドで施工する技術の開発に取り組んだ。分割することでシールドは小型になるため、機械費を低減させるだけでなく、地表面への影響を小さくすることが可能になった。当初は、鉄道を横断するアンダーパスをターゲットに検討していたが、営業線の地下化、あるいは地下道などへの需要も多くある。

大断面を1台の掘削機で一気に施工せず、小断面のトンネルに分割して施工することで、個々のトンネルの掘削による周辺の地山に与える影響は小さくなる。かつ、トンネルはボックスを積み上げるように施工するため、個々のトンネルの覆工が、大空間を支保する役割を果たすので、大断面を安全に施工することが出来る。個々のトンネルを隣接させるために、トンネル間には継手を設けている。

本報告は、開削が困難な場所で大断面を分割して施工している事例と継手に関して、現状での問題点、考え方をまとめたものである。

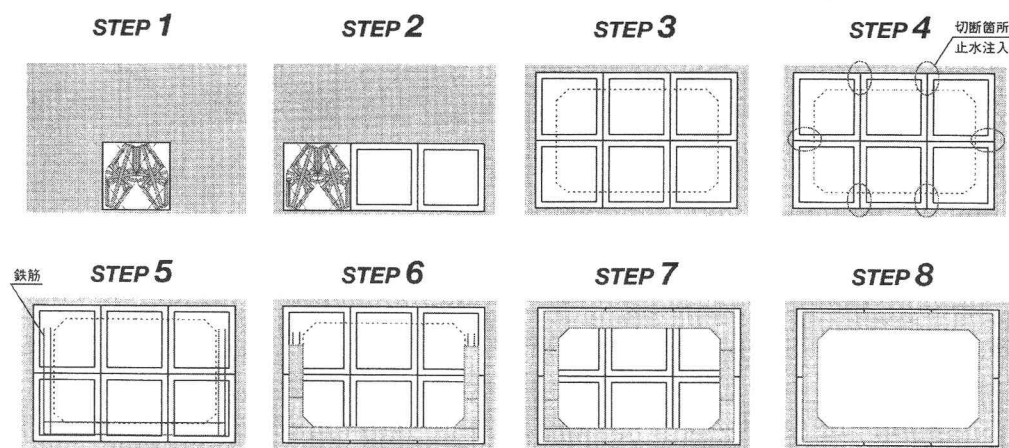


図-1 施工手順図

2. 施工方法の概要

施工手順について図-1で説明する。ここでは矩形トンネルの断面を上下に二分割し、横方向を三分割、合計六分割している。まず、1台の掘削機械で下段中央より掘進し、全断面のトンネルを掘進完了する。トンネル間の目地部の隙間を処理後、覆工を部分的に解体しながら、鉄筋を組み立て、コンクリートを打設して、全体を大きな断面のトンネルを構築する。これらの作業は切断や溶接が伴うため、覆工の材料は鋼製とする（以下、鋼殻と呼ぶ）。

図-1に示すように隣り合うトンネル同士は接触させながら掘進する。このためにトンネルの掘削はシールド方式とせず、推進方式とした。掘削機械の内部でセグメントを組み立てるシールドでは、トンネル間に40～50cm以上の隙間が生じることはやむを得ない。これに対し、推進方式にすることで掘削機械と鋼殻の外側寸法を同一に出来る。

さらに、トンネル間に継手を設けることで確実にトンネル間を接触させることにした。まず、基準のトンネルを所定のラインに掘進し、それをガイドに隣接するトンネルを掘進する。

継手をパイプルーフのように鋼管の外側に露出させると、継手の高さだけ隙間が生じることになる。そこで、先行するトンネルの鋼殻に溝を設け、後行するトンネルにレールを設置することにした。覆工に溝を設けるためにも覆工は鋼製の方が製作しやすい。写真



写真-1 継手（引張試験の試験体）

—1に継手の一例を示す。これは第4節で述べる試験の供試体である。

3. 継手の機能

鋼殻のリング間あるいはピース間のボルト・ナットも継手と呼ぶが、ここでは隣り合うトンネル間の継手に関してのみ言及する。

継手として求める機能を以下に示す。

- ①ガイド
- ②止水
- ③構造材

鋼殻の組み立てに起因する段差、鋼殻および掘削機械の製作精度等を考慮して、継手には0～4cmの余裕

をもたせることにしている。継手にゆとりが無いと掘削機械と鋼殻が競り、推進ができなくなることが予想される。現実には掘削機械のカット余堀り量が必要なため、トンネル間には確実に2cm程度の隙間を必要とするため、隙間は2~4cmに制御するのが良い。

推進に伴い、トンネル間に土砂が圧密され、後行の鋼殻が外側へ押し出されたり、継手の溝内に土砂がつまり、推進不能になることも考えられるが、これらは最適な滑剤の選択により解決せざるを得ない。しかし、これらの現象は机上で、あるいは簡単な実験で実現することが容易ではなく、施工実施を重ねることで確認せざるを得ない。

レールの取り付け方法についても検討条件に応じて変えざるを得ない。

①全線に連続

②数個を独立

何を継手の機能とするかによっても異なるが、止水や構造材として利用する場合は全線に連続して設置する必要がありそうだが、ガイドとして利用する場合、特に、施工距離が長くなった場合や曲線区間がある場合は、継手が支障にならないように、40cm程度のレールが数個あれば十分と考える。

トンネル間の距離が短い場合、立坑間で継手部を洗浄し、継手の内部にモルタル等を詰めて、止水機構として利用することは容易である。この場合、ホース類を通しやすくするために、積極的に大きな空間を作ると都合が良い。止水を目的にした継手の例を図-2に示す。

継手の箇所数は、下段の基準トンネル側方に隣接するトンネルの場合、上下に2列設置することを標準にしている。上段のトンネルの場合、最初のトンネルは下部に2列設置するが、さらに隣接するトンネルの継手を側部に2箇所、下部に2箇所、合計4箇所設けると、継手に大きく拘束されることになり、そこまで施工精度の管理はでき無いと考える。そこで、側部は上端に1箇所、下部は外側に1箇所の合計2箇所で行うことにする。

4. 継手性能の確認実験

(1) 推力の算定

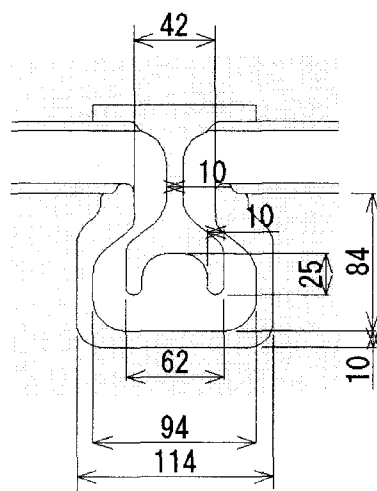


図-2 止水を考慮した継手の例

総推進力は以下の式で表される。

$$F = F_0 + (F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5) \times s$$

ここに

F0: 先端抵抗力

F1: 鉛直荷重および底面反力による摩擦抵抗力

F2: 側圧による摩擦抵抗力

F3: 鋼殻の自重による摩擦抵抗力

F4: 継手による摩擦抵抗力

F5: 鋼殻の外周面に働く土と鋼殻の付着力

s: 滑材効果による推進力低減率 (0.7) である。

本工法では70~80mを越える施工延長に対して用いる掘削機械は掘削機械内部に推進ジャッキを設けることにしている。掘削機械を前胴と後胴に分け、掘削に関わる推力を推進ジャッキで分担する。このため、 $F_0 = 0$ である。

F2は左右に隣接するトンネルを施工時には、片側からの側圧がかからないため基準トンネルの半分と考えることができる。同様に、F5に関しても1辺または2辺を0に見積もることが出来る。逆に、基準のトンネルの場合は $F_4 = 0$ に対して、隣接するトンネルの施工時にはF4が発生する。

とりあえず、中押し函の設計、元押しジャッキの設備を計画するための計算式であるが、F2, F4, F5に関し、実際に先行するトンネルと接触する面の力がどのように働いているか不明であり、今後、実施によりデータを収集する必要がある。

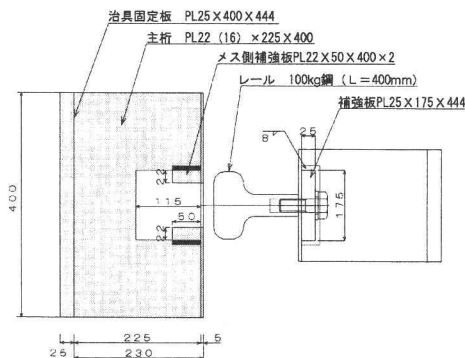


図-3 試験体寸法

(2) 継手にかかる力の算定

継手にかかる力については、さらに不明である。今回の実験ではガイドに最大引張力として 333kN (推力が 40000kN 作用したとき 4.8m で 4cm 離れようとする力を想定) 発生すると仮定して設計した。

(3) 実験

実験は継手の製作性と耐力の確認のために行った。先行するトンネルの溝は連続して設置され、後行するトンネルに設置するレールは長さ 40cm で検討している。鋼殻は幅 1.2m、4 本主桁を想定し、試験体は主桁間を抜き出した寸法、40cm とした。試験体寸法を図-3 に示す。レールを溝に挿入した状態で、お互いを引っ張る(写真-2)。試験は 3 ケース実施した。

CASE1 は先行トンネル (溝側) の主桁厚を 22 mm、後行トンネル (レール側) の主桁厚を 16 mm、CASE2 は先行トンネルの主桁厚を 16mm、後行トンネルの主桁厚を 22mm にしている。CASE3 はどちらも 22 mm である。

レールは 3 本のボルト (M24) で鋼殻に設置している。ボルトの許容応力は 290N/mm^2 であるため、3 本で 460 kN ($>333\text{ kN}$) まで破断しない。レールは M24 のタップ加工が可能な厚さということで 100kg 鋼 (幅 39mm) に決めている。

(4) 実験結果

荷重と目開きの関係を図-4 に示す。最終荷重はいずれも 390kN 以上であり、レールの補強板の変形により、端部の溶接が破壊した。レールの主桁厚さを 16

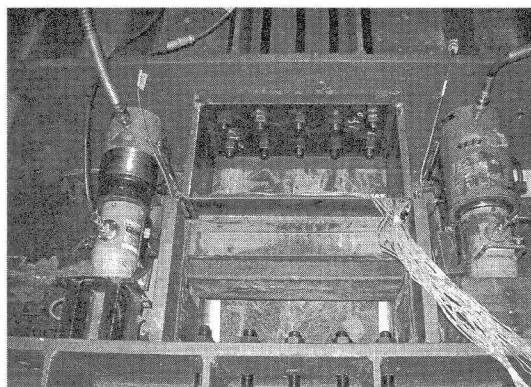


写真-2 引張試験状況

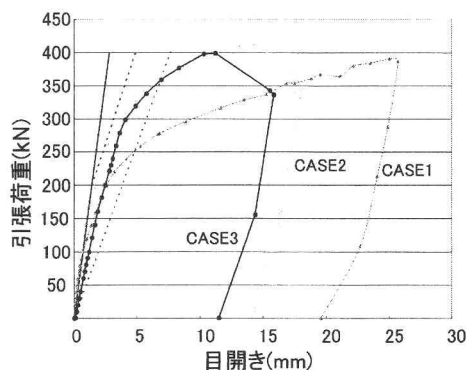


図-4 荷重と目開きの関係

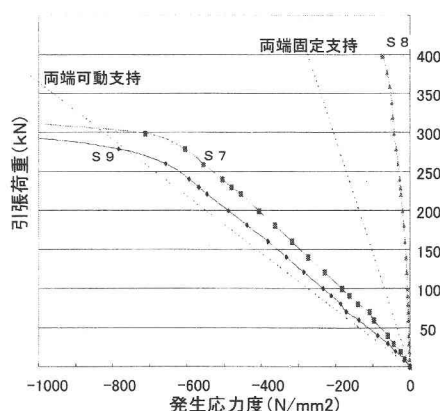


図-5 荷重とレール補強板に発生する応力の関係

mm にした CASE1 の目開き量が多いが、破壊に対しては主桁の厚さは寄与していない。

CASE3 の荷重とレールの補強板に発生する応力度の関係を図-5 に示す。両側のボルトに発生する応力は、

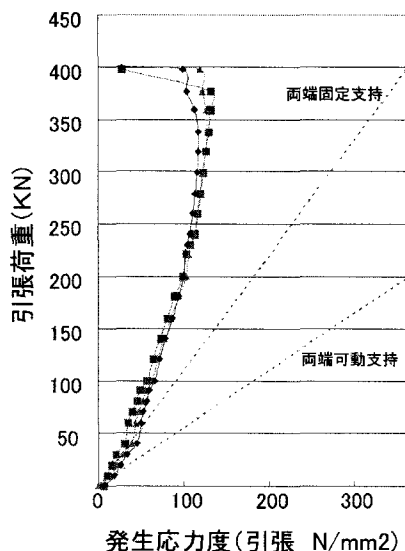


図-6 荷重と溝側補強板に発生する応力の関係

両端可動支持の計算値に近似しているが、中央のボルト (S8) にはほとんど発生していない。また、CASE3 の荷重と溝側補強板に発生する応力度の関係を図-6 に示す。計算値より低い応力を示している。

この結果から、レールをボルトでとめる構造は、経済的では無いと判断される。しかし、断面の寸法と継手の寸法はバランスの悪い寸法とは思わない。

5. 本体構造の設計

(1) 断面の分割

断面の分割に際し、鋼殻を本体構造物として利用するか、仮設として扱うかを決定する。仮設として扱う場合は、構造物の外側に鋼殻の桁厚を余分に見る必要がある。断面はできるだけ正方形に近い形に分割することで掘削機械の選定の際に有利になる。

断面を小さく分割すると、掘削機械が小型になり安価になるが、工事期間が長くなり、発生するスクラップの量も増える。鉄道横断トンネルの場合、掘削機械が小型なほど、軌条に与える影響は小さくて有利である。逆に、断面を大きくすると、工事期間が短縮し、継手の数が減り、止水の点でも有利になる。

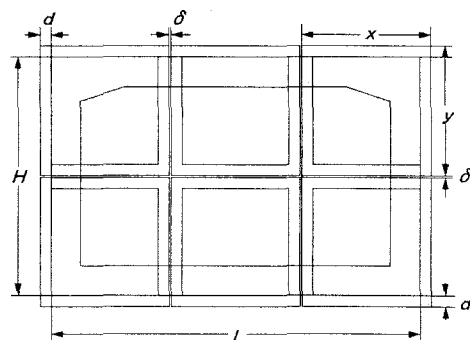


図-7 断面の分割例 (仮設として利用)

ただし、鉄筋を組み立て、コンクリートを打設するといった一連の作業を考えると、ある程度の作業空間が必要である。そこで、内空断面として3 m程度確保できるように分割するのが良い。

このように考えると、矩形の道路トンネルは上下に2分割されるパターンが多い。類似断面の仕事が増え、掘削機械が汎用機として使用できるようになるのがベストである。

(2) 継手を考慮した断面の設計

断面の分割には、出来形の管理を考慮する必要がある。基準のトンネルが正確に掘削できていれば、継手の隙間だけ広がる可能性があるため、単に分割するだけで、安全側に施工することが可能である。

しかし、基準のトンネルが正確に掘削できているとは限らず、後続トンネルの施工精度や継手の拘束を考慮すると、鋼殻と構造物寸法間には以下の式が得られる。ただし、鋼殻を仮設として利用し、実績からローリング量を1/150に設定している。

$$m x + (m - 1) \delta = L + 2 d + 2 a + 2 H / 150$$

$$n x + (n - 1) \delta = H + 2 d + 2 a + 2 L / 150$$

ここに

x : 鋼殻幅

y : 鋼殻高さ

d : 鋼殻の主桁高さ

L : 矩形トンネル幅

H : 矩形トンネル高さ

δ : 鋼殻間の隙間

a : 蛇行量 (50mm)

m : 水平方向の分割数

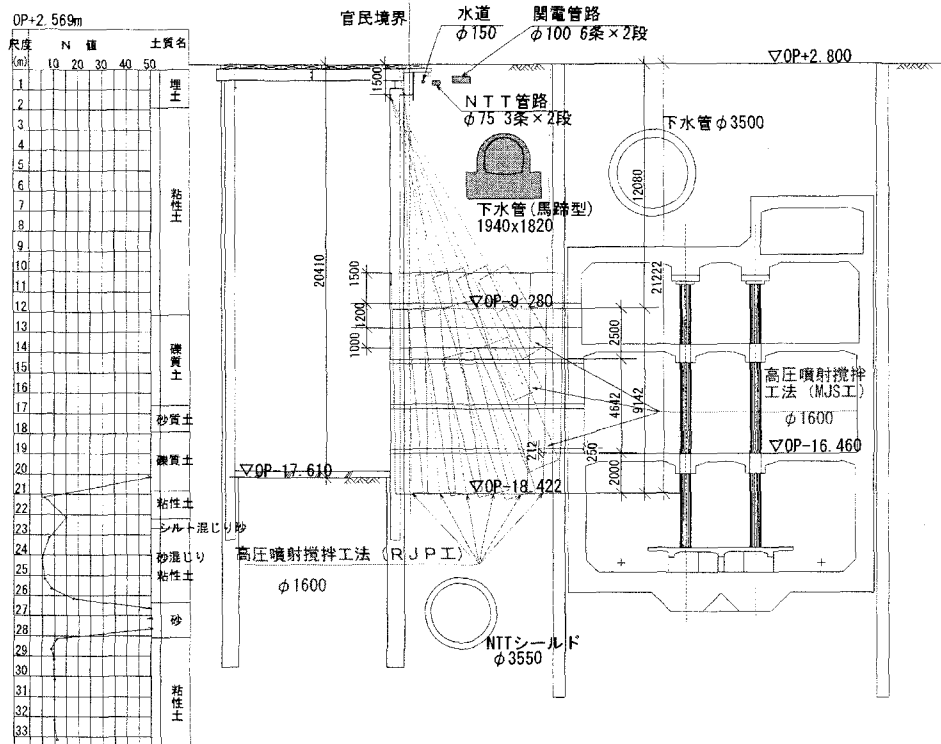


図-8 工事箇所断面図

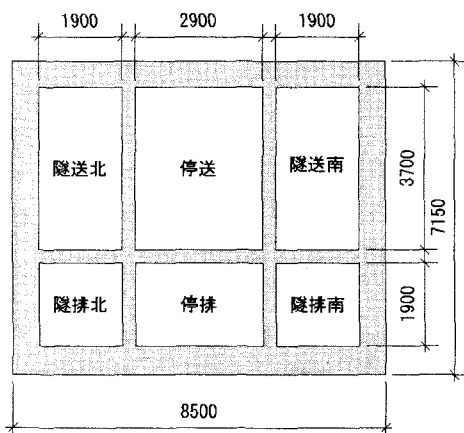


図-9 当初のボックスカルバート断面

n : 垂直方向の分割数

実施工では、先行するトンネルにローリングが発生していればそれを修正する方向に制御管理するので実工事が増えれば、見直す必要がある

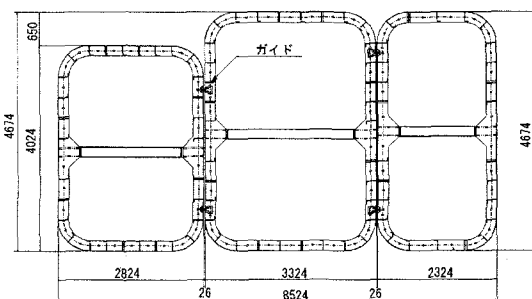


図-10 分割トンネルの断面図

6. 工事への適用

(1) 工事概要

工事名 :

高速電気軌道第8号線緑橋停留場工事 (6工区)

発注者 : 大阪市交通局

このうち 換気洞道 8.524m×4.642m 延長 9.6m

薬液注入量 12.524m×9.142m×9.6m

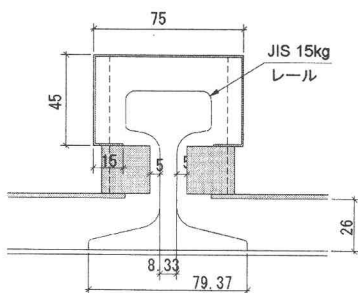


図-11 使用した継手

(2) 断面分割シールドの設計

地表面下に馬蹄形の下水道管（1940×1820mm）をはじめ、電力管路（φ100mm 6条×2段）、水道管（φ150mm）が埋設されている。下水道管の移設は困難であり、下方にはφ3550mmのNTTの管路が敷設されていて、土留め杭が打設できない状況であった。（図-8）

そこで、非開削で施工することを検討した。図-9は当初の断面形状であり、これを3断面、縦長の矩形に分割した。断面は駅の構造から制約され、覆工厚を決めるとトンネル間の隙間は26mmであった。トンネルに変更した最終断面の形状を図-10に示す。

継手に関しては、距離が短いこと、実験によりレールをボルトで固定しなくても溶接で十分耐えられることを確認できていたので、15kgレールを用いることにした。（図-11）

3つの断面が異なること、距離が短いことから、掘削機械は製造せず、刃口推進で施工する。地盤は被圧された砂礫の地盤であるため、トンネルの上方2.5m、下方2.0m、両側各2.0mの区域を高圧噴射攪拌工法により地盤を改良することにした。埋設物を避ける施工になるため、削孔方向が鉛直より20度以下の場合にはRJP工法、20度以上の場合にはMJS工法を採用した。

(3) 施工実績

写真-3は、中央トンネルの推進状況であり、白いラインが継手の溝である。1500kNジャッキを7台装備した。

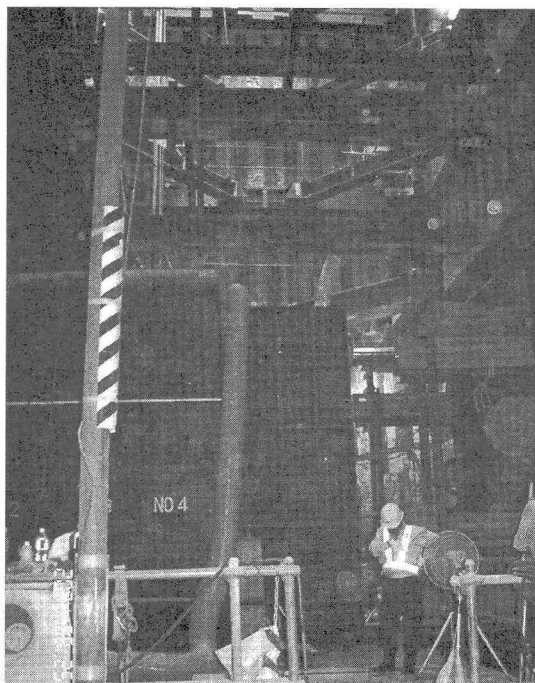


写真-3 中央トンネルの推進状況

鏡開けから、到達、設備の撤去まで、3週間を要した。現在、2本目の推進を開始したところである。

7. おわりに

機会があれば3本のトンネルが完成した状況を発表したいと考える。本技術はマニュアルのような形に系統だっていない。本構造の設計については参考文献を参照されたい。なお、止水継手は土木設計部の下村泰造、伊藤友一両名の発案である。

参考文献

- 1) 湯口正樹, 服部佳文, 真柴浩: 大断面分割シールドの開発(その2) 大断面分割シールド工法におけるトンネル構造の設計手法について, 土木学会第59回年次学術講演会, 6-063, 2004
- 2) 大畑裕, 植田堅朗, 若林正憲, 進藤芳典: 大断面分割シールドの開発(その3) 継手部曲げ実験, 土木学会第59回年次学術講演会, 6-064, 2004