

鉄道直下の大断面トンネル施工時の計測管理

MEASUREMENT CONTROL OF BEHAVIOR DURING EXCAVATION OF LARGE SECTION TUNNEL UNDER EXISTING RAILWAY

佐々木 良作¹⁾・高山 努¹⁾・塚田 昌基²⁾・木村 正樹³⁾・鳥居 敏³⁾

Ryosaku SASAKI, Tsutomu TAKAYAMA, Masaki TSUKADA, Masaki KIMURA, Satoshi TORII

SHINMINATOGAWA TUNNEL is the large section tunnel planned in uncompacted ground which consists of water and loose sand. A railroad runs right on the tunnel entrance and the surface settlement caused by tunnel excavation was a big problem. Therefore, construction method was reconsidered and finally advancing side drift and piperroof method were accepted to drift minimize the surface settlement. During excavation, the deformation of the piperroof and ground were measured at the same time. Based on the measuring data, we predicted precisely each settlement of next excavation step and consequently finished construction safety.

Key words : measurement control, shallow large section tunnel, PIPEROOF method

1. はじめに

NATMによる山岳トンネル工法は、積極的に補助工法を採用することにより次第にその適用範囲を広げており、近年ではより条件の厳しい都市トンネルへの採用も増加している。しかし、重要構造物が影響範囲内に存在する場合にはその管理方法が問題となる。この場合、各種計測を実施して構造物および地下水の挙動を適確に把握することはもちろんであるが、施工に伴う予測を精度よく行うことが重要である。本文は鉄道直下の含水未固結地山内に大断面トンネルを施工した際の計測管理結果についてのべるものである。

2. 本トンネルの概要

新湊川は、兵庫県南東部の六甲山に源を発し神戸市内の高度に都市化した地域を南下して大阪湾に注ぐ二級河川であり、過去幾度となく水害をもたらしている。新湊川トンネルは阪神・淡路大震災により被災した区間の河川災害復旧事業の一環として、既設トンネルの流下能力不足の解消を目的として、拡幅改築する河川トンネルである(図-1参照)。このうち、今回報告する呑口側区間は開削トンネル部95m(ボックスカルバート)と山岳トンネル部323m(NATM)の区間である。

周辺地質は新生代第四紀更新世の大阪層群(粘土・砂・砂礫の互層)および沖積層が分布し、トンネルと斜交して会下山断層が存在することが推定され、複雑な地質状況を呈している(図-2~4参照)。自然地下水位はGL-6~28mであるが、一部に被圧層があり、ほぼ地表付近まで被圧されていた。

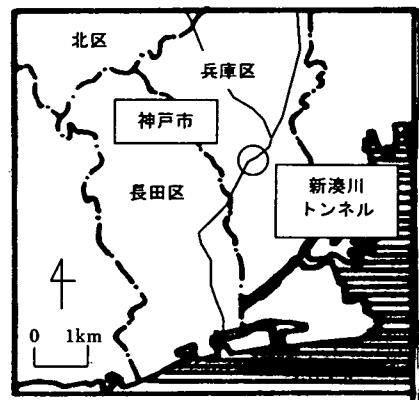


図-1 調査地案内図

1) 正会員 兵庫県神戸土木事務所災害復旧室

2) 正会員 西松・新井特別共同企業体 湊川出張所

3) 正会員 応用地質株式会社

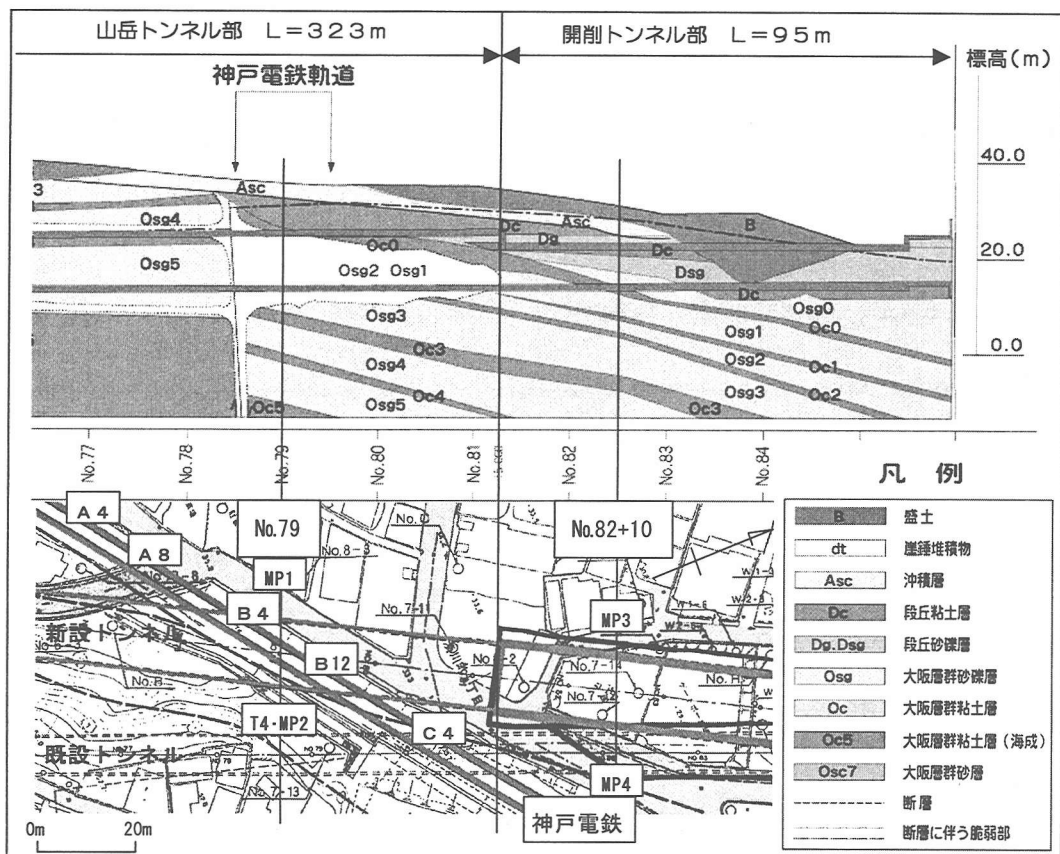


図-2 地質縦断面図および計器配置図

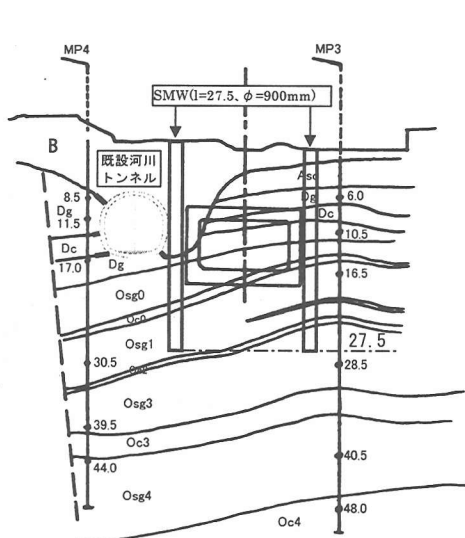


図-3 地質横断面図 (No.82+10)

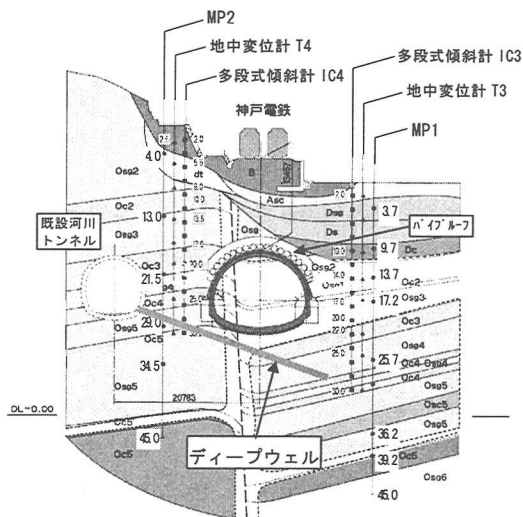


図-4 地質横断面図 (No.79+00)

3. 本トンネルにおける技術的課題

呑口側工区の山岳トンネル坑口部分における技術的課題を以下に示す。

- ①含水未固結地山に約 144m^2 の大断面を掘削する。
- ②坑口から 85m 区間は土被 1 D 程度であり、地上にはトンネルと斜交して神戸電鉄営業線が位置している。
- ③自然地下水位が高く、一部に被圧地下水も確認されている。
- ④会下山断層の存在が推定されており、周辺は複雑な地質状況である。

こうした条件下にあって、掘削や地下水低下が地表面沈下をもたらし鉄道の運行に影響を与えることがないよう、地表面沈下監視とその抑制は最重要課題である。

当初設計では、この坑口区間は上半先進掘削工法 + A G F による施工とされていた。しかし、追加地質調査を実施した結果、以下のようなことが懸念された。

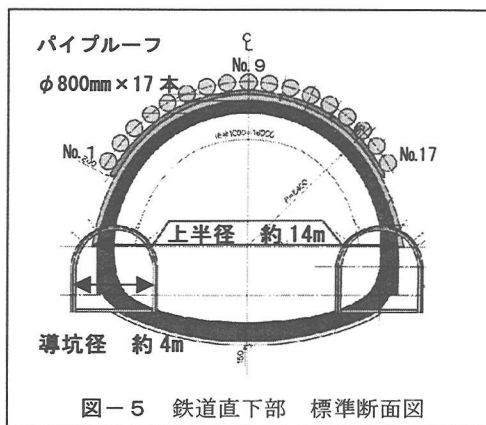
- ・ トンネル脚部相当層において平板載荷試験を実施したところ、地耐力不足による脚部沈下の発生が予想される。
- ・ 一部に均等係数の低い砂層が認められ、流砂現象を起こす可能性がある。
- ・ トンネルと斜交して会下山断層が位置しており、断層を境にして地下水の動きが異なる可能性がある。

これらの諸問題を解決するため、

- ① 掘削方式を側壁導坑先進掘削工法とし、地耐力不足を補うとともに、地質の確認および地下水低下も併せて行う。
- ② 坑口から 85m 区間は切羽天端の安定性確保と鉄道軌道の沈下を抑制するため、パイプルーフ（ $\phi 800\text{mm} \times 17$ 本）を採用する。

こととした（図－5 参照）。

また、施工中の観測体制として、鉄道軌道沿いに水盛式沈下計 42 台、トンネル沿いに地中変位計、多段式傾斜計各 6 孔、パイプルーフ沈下計（E L ビーム）などの自動計測システムを構築した。また地下水観測として単孔式多深度間隙水圧計（MP システム）4 孔などを配置した。



図－5 鉄道直下部 標準断面図

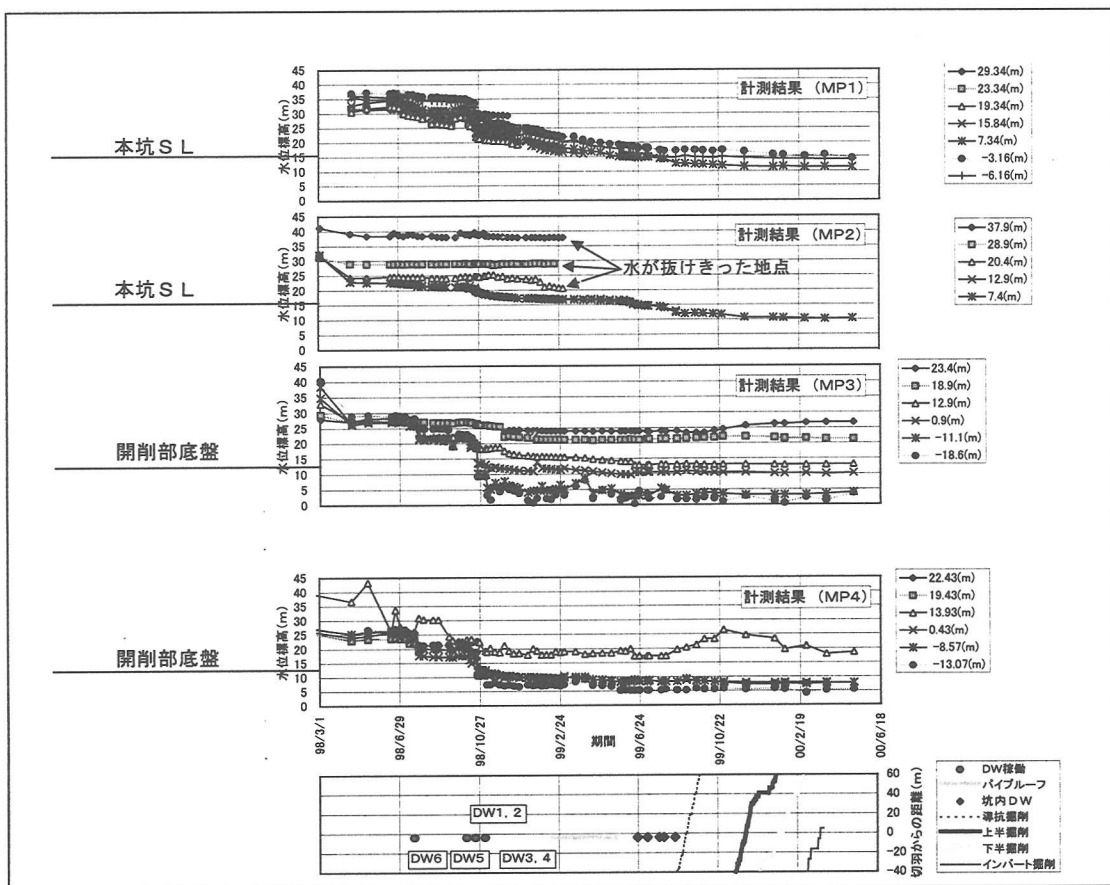
4. 計測結果と対応

(1) 地下水関連

MP システムによる地下水位計測結果を図－6 に示す。まず、開削部内のディープウェル稼働により No.82+10（開削部側）の地下水位が急激に低下している。しかし、No.79（トンネル側）の測点では水は低下しきらず、S L 付近に地下水位が位置している。そこで、隣接する既設河川トンネルからのディープウェル工法による強制排水を追加施工した。この結果、地下水位はトンネル路盤付近まで低下した。しかし、導坑施工時には複数の断層で遮断された区間の局所的な溜まり水が土砂を伴って流出する現象が何度か見受けられた。上半掘削時以降はこのような現象は見られず、導坑による地下水位低下の効果が顕著であった。

(2) 地表および地山の変形

パイプルーフ施工前の段階では、本坑掘削径と比較するとパイプルーフや側壁導坑の掘削径は小さく、影響は少ないものと予想していたが、計測の結果パイプルーフ施工で 15mm 程度、側壁導坑掘削で 7mm 程度の地表面沈下が発生した。沈下の発生は突発的なものではなかったため、鉄道側で軌道整備をすることにより対処可能であったが、同じくパイプルーフを施工している東山トンネル（事業主：名古屋市道路公社）でも同様の状態が発生しており、上半掘削時の挙動があらためて問題となった。



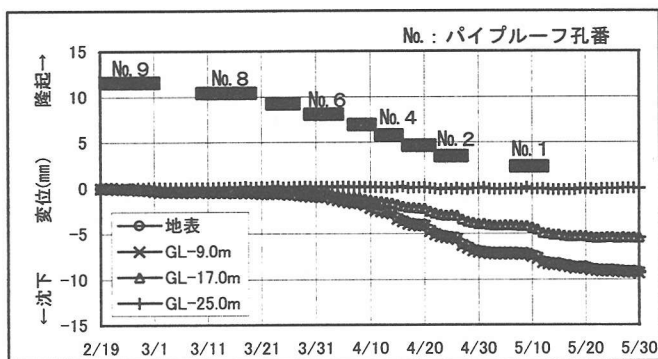
図－6 MP測定結果経時変化図

このため、導坑掘削時までの計測データを整理し、これまでの挙動特性をとりまとめたところ、以下の特徴が見受けられた。

- ① パイプルーフ掘削時には、施工範囲が拡大するほど地表面沈下量が大きくなる（図－7 参照）。
- ② 導坑掘削時の沈下発生と収束は導坑径ではなく上半径（≒パイプルーフ施工幅）と相関がある。
- ③ トンネル天端付近の地中沈下量と地表面沈下量はほぼ等しい。

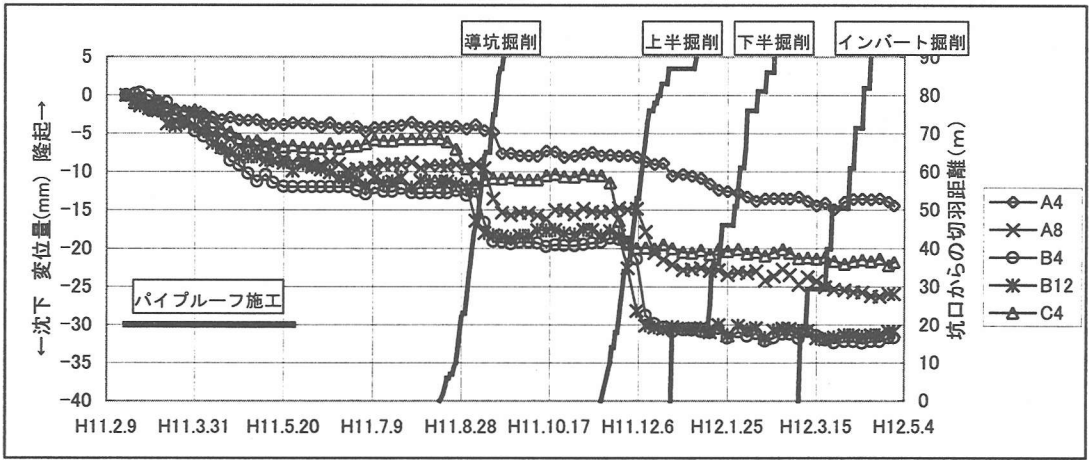
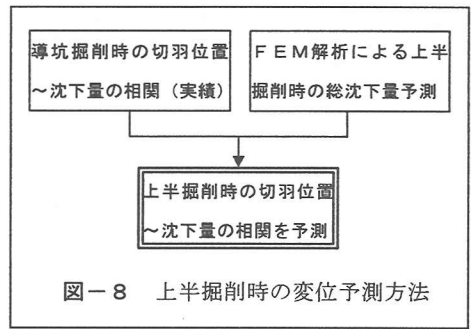
これらの特徴より、パイプルーフ施工時には上半径を掘削したのと同程度のゆるみが発生し、それが地表まで到達して沈下を生じたものと考えた。さら

に、上半掘削時の沈下発生状況（切羽位置と沈下発生・収束時期の関係）は導坑掘削時とほぼ同様で、総沈下量だけが大きくなる、というように予測をたてた。

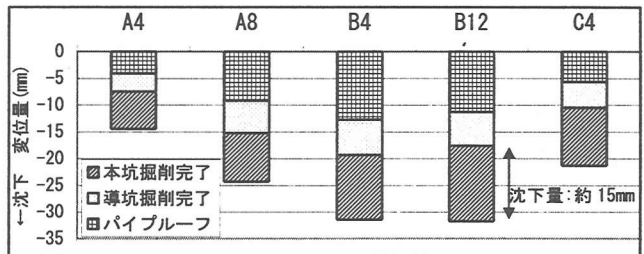


図－7 パイプルーフ施工時地中変位計（T4）測定結果図

そこで、導坑掘削時の計測データを基にFEM解析を行い、上半掘削時の総沈下量（最大約 30mm）を推定した。さらに、導坑掘削時のデータと比較することにより、上半切羽位置と各計器の沈下量の相関を予測曲線として作成した（図－8）。一方、施工時には軌道整備を随時実施することで地表面沈下に対応することとした。また、側壁導坑掘削時の変位傾向を詳細に確認するとフォアポーリング施工時が最も沈下が大きかったことから、ロックボルト打設により地山を緩める影響を考慮して、当初予定していた本坑でのロックボルト施工を削除した。

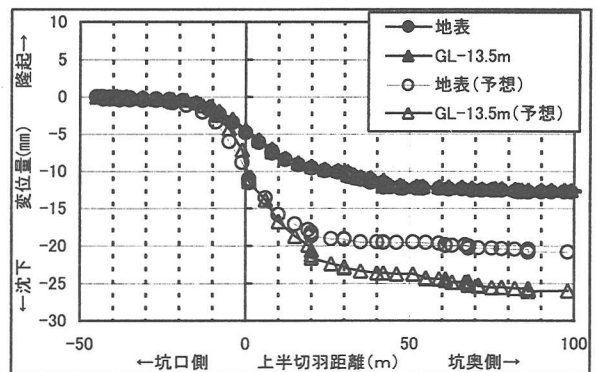


施工した結果、上半掘削時の地表面沈下量はトンネル直上のB12測点で約15mmとなった（図－9・10 参照）。また、切羽位置ごとの予測沈下曲線の形状はほぼ予測通りであった（図－11 参照）。地表面は全体的に沈下したが不連続な挙動はなかったため、2度の軌道整備実施のみで無事上半掘削を完了した。また、下半・インバート掘削時には地表面沈下は2mm 以内の小さな値で施工を完了した。



（3）導坑掘削時と上半掘削時の先行変位比率比較

パイプルーフ沈下計測結果を用いて、導坑掘削時と本坑掘削時それぞれについて、同じ切羽位置での沈下割合と切羽位置との相関を比較した結果を図－12 に示す。これによると、変位の出現は上半掘削時よりも導坑掘削時の方が早くなっている。通常変位の出現は掘削直径に依存するといわれているが、今回の導坑掘削では左



右ほぼ同時に導坑掘削を実施したために両導坑を結んだ幅分（≒上半直径）に依存した変位出現傾向となったものと考えられる。

変位出現の違いは、上半掘削時には側壁コンクリートと1次覆工で掘削時のゆるみを直接受けることによりゆるみ範囲の拡大を押さえているが、導坑掘削時にはそれができないためにゆるみ範囲を拡大させ、前方まで変位を生じさせたためと想定している。

なお、先行変位比率は導坑掘削時・上半掘削時とも30～40%前後であった。

（４）その他

本施工区間内は、トンネル掘削時に会下山断層を貫くため、切羽に会下山断層とされる地層の大きなずれとそれに伴う破碎帯が出現することが予想された。しかし、実際に掘削した結果、北西－南東方向に幾条もの明瞭な地層のずれ（小断層）が認められた程度であり、会下山断層帯とでもいえるような状態であった。各小断層ではその周辺部が著しくゆるんでいたり地下水を胚胎している等の明瞭な変質を示す現象は観察されなかった。未固結な堆積物層に生じる断層は、その活動期に1箇所に集中した破碎帯を形成せず、ひずみを分散させるように各所で断層を生じるものと考えられる。このことは、断層出現部における天端沈下・内空変位計測結果がその他の区間と比較しても特に大きくはない、ということとも一致している。

５．まとめ

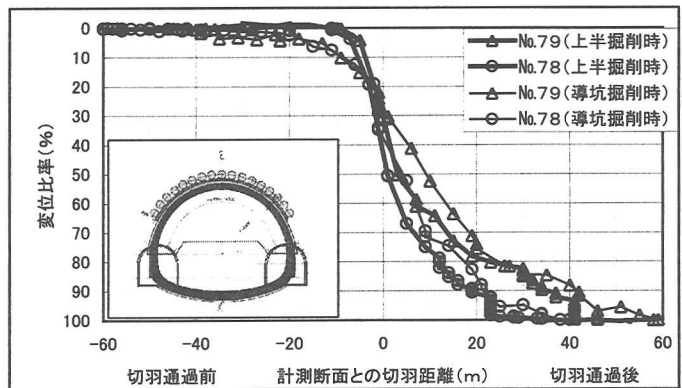
都市域における山岳トンネル施工時に補助工法として長尺先受け工を採用した場合には、地表面沈下の抑制を第一の目的としている場合が多い。しかし、今回の計測結果ではパイプルーフ施工により上半掘削時とほぼ同程度の地表面沈下が発生している。パイプルーフ施工時の沈下は1孔ごとの鋼管径ではなくパイプルーフ施工幅（上半径）に依存するものと推定される。このことは今後長尺先受け工を採用する場合、考慮すべき事項であるといえる。

また、今回の施工においては、自動計測を基本とする計測体制を構築し、精度良くとらえた計測結果を素早く施工に反映することにより、鉄道線の営業に影響を与えることなく工事を行うことができた。都市部における計測工の重要性をあらためて認識した次第である。

最後に、現場計測の実施にあたりご指導いただいた「神戸電鉄と新湊川河川トンネルの交差部工事に伴う技術検討会（委員長：櫻井春輔広島工業大学学長）」の関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 塚田昌基、木村正樹、中垣秀隆；大阪層群における単孔式多深度水圧の測定、日本応用地質学会関西支部 平成12年度研究発表会概要集、pp11～14、2000.06
- 2) 塚田昌基、岩角仁夫；鉄道営業線に近接した住宅地内における大規模開削工事の計画および施工について、西松建設社内発表会資料、1999.11
- 3) 木村正樹、鳥居 敏、中垣秀隆；E L ビームセンサを用いたパイプルーフ沈下計測例、社団法人全国地質調査業協会連合会 技術フォーラム2000講演集、pp161～162、2000.09
- 4) 大断面トンネルの都市ナトムによる施工、土木技術 53 巻 12 号、1998.12



図－12 導坑・上半掘削時 切羽位置～変位比率の比較図