

35年前に施工された在来トンネルの拡幅時における挙動計測

DEFOMATIONAL BEHAVIOR OF A 35YEAR-OLD TUNNEL SUBJECT TO EXTENSIONAL EXCAVATION

北田 正彦¹⁾、林田 清高²⁾、櫻井 春輔³⁾、進士 正人⁴⁾、木村 正樹⁴⁾

Masahiko KITADA, Kiyotaka HAYASHIDA, Shunsuke SAKURAI, Masato SHINJI, Masaki KIMURA

Dramatic traffic increase in modern day necessitated an extension of cross section of Tennozan tunnel, which was constructed by a side drift method 35 years ago, in a very difficult ground condition. Knowing that the initial construction had experienced large deformation and high pressure on concrete lining, a special care was taken for planning and selection of construction method. As a result of the actual extension of the tunnel cross section was completed only with minor deformation with fair confidence in tunnel stability. Displacement recorded for a ordinary section was less than 1mm at the depth of 2m and at most 3mm at surface. That recorded for an extended section, however, went up to 2~3 mm at the depth of 4~5m, and was 10~14mm at surface on the right side.

Key Words: defomational behavior, extensional excavation, ground ring

1. まえがき

交通量増加に伴う渋滞緩和のための新しいトンネル建設は、地下水低下や、地表面沈下、発生土の廃棄・処理などの数多くの環境への影響が予想される。従って、環境への配慮を考えれば低コストで長期間メンテナンスフリーを目指した既設トンネル改築が、今後開発すべき重要な施工技術のひとつとなると考えられる。著者らは、高速交通網のボトルネックとなっていた在来工法で施工された二車線の道路トンネルの改築を行い、その際の計測で特徴的な傾向が得られた。

今回発表するプロジェクトは、特に交通量が激しく、交通渋滞の慢性化している京都南IC~吹田ICの改築プロジェクトであり、4車線から8車線の道路拡幅工事を主体

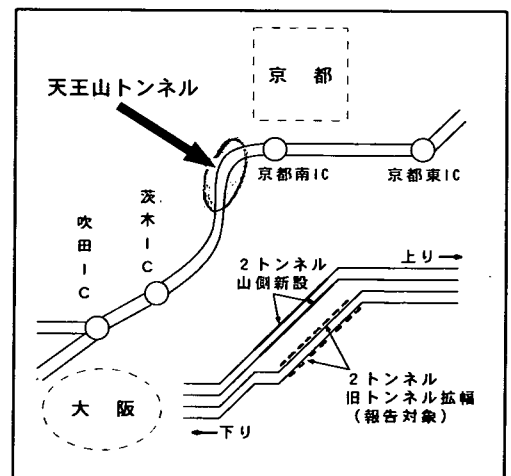


図-1 施工箇所案内図

とし、高速道路本来の機能を回復するとともに沿道の環境改善を図ることを目的とした。改築プロジェクトの中で天王山トンネルは、京都と大阪を結ぶ最も重要なトンネルであり、35年前の建設時に数十cmの大きな変形を生じたため改築前の調査と拡幅時の変位計測を実施した。

- 1) 正会員：日本道路公団 本社
- 2) (株)ロードエンジニアリング
- 3) 正会員：工学博士 広島工業大学
- 4) 正会員：応用地質株式会社

2. 天王山トンネル改築の概要

改築工事区間では、新たに2本の二車線道路トンネルを旧トンネルの山側に新設すると同時に、既設の二車線トンネルを拡幅した。旧トンネル拡幅の目的は、建築限界が旧基準で作られているため狭小であり、車両通行上交通渋滞の原因にもなっているため、現在の建築限界を満足するような断面を確保することである。

断面拡幅方法には数多くの方法が提案されたが、以下の2つの方法が検討された。

- ① トンネル縦断を下げ、建築限界を満足させる改築方法
- ② 既設覆工コンクリートを取壊し、地山をごくわずかであるが拡幅掘削し、従来のロックボルト・吹き付けコンクリートで支保を行い、地山が安定したあと、覆工コンクリートを打設する改築方法

前者の方法では、トンネル自身の改築のコストは比較的安価になるが、トンネルの縦断線形が変更になるため、天王山トンネルでは坑口付近に長大橋梁や砂防河川があるため不適で後者の方法を採用した。

また、天王山トンネルは在来工法で施工されたトンネルであり、建設時地山状況が劣悪な部分が大半を占め、強大な地圧と支保工の変状に苦勞した。したがって、拡幅時にも大きな変形が発生することも予想され、旧覆工の取壊し方法および取り壊した時の地山挙動の評価が問題となった。検討や試験施工の結果、覆工の取壊し方法は、施工性や工期を考慮して超大型ブレイカを使用し、裏込め注入とセメント系の薬液注入で空洞と天端の緩んだ岩盤を固めた後に掘削する事にした。支保については、注入により天端の安全性が確保されていること、30数年経過した地山は安定していると予想されたことより、吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工を主体とした支保部材とし、ロックボルトは原則的に省略した。

3. 天王山トンネルの地形・地質概要

当地域の地質断面図および地質層序を図-2に示す。当地域は京都盆地と大阪平野の境界にあたり、両側に山地が迫り、地形的に狭窄部をなしている。低地部は沖積低地と中位段丘および高位段丘に相当する平坦部とに分けられる。また山地部は、明瞭な山麓線をもって比較的急峻な山腹斜面と、山頂標高に定高性を有する尾根部から構成される。

当地域には中古生層の砂岩と砂岩・頁岩主体のメランジェ層が分布する。このメランジェ層は破碎帯が数多く存在しており、微小な割れ目や粘土化している部分も多いのが特徴である。調査地の南西部には第四紀層の大阪層群（砂・粘土・砂礫）が分布している。

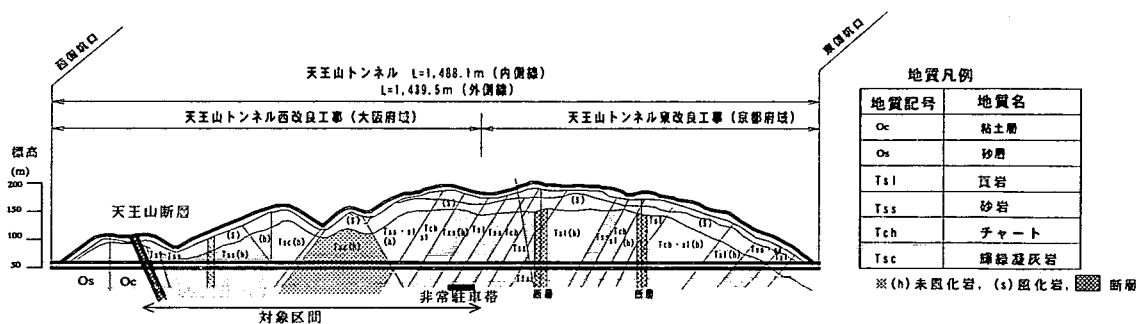


図-2 地質断面図および地質層序

今回拡幅を実施したトンネルの山側に、2本のトンネルが平行して新設された。このトンネルも地質的にはほぼ今回拡幅のトンネルと同様であるためNATM工法による新線工事施工時の結果を参考として当地域の地山物性値を推定した。図-3に、新線掘削時の変形より算出した見かけ弾性係数と、新線掘削前の調査時に実施した弾性波速度の結果を比較したものを示す。図に示すように、今回解析を実施した区間の見かけ弾性係数はおおむね500Mpa以上を示している。また、同様の区間における弾性波速度は3.6km/sとなっている。

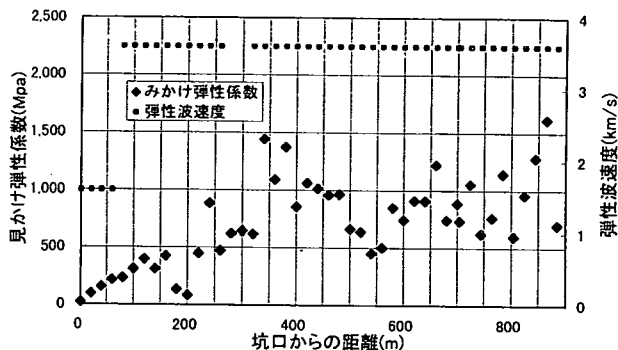


図-3 新線掘削時の見掛け弾性係数分布

4. 拡幅工事前の試験結果

1) 孔内水平載荷試験

ゆるみ領域内の弾性係数を把握するために既設覆工天端から5mボーリングを実施し、孔内水平載荷試験を実施した。深度と変形係数の分布図を図-4に示す。図に示すように、岩級区分によるばらつきが大きいものの、弾性係数はほとんどの地点で10~500Mpaの範囲内となっている。前述の新鮮掘削時のデータでは500Mpa以上が地山新鮮部と考えられるため、孔内載荷試験を実施した壁面から5mまでの範囲はゆるんだ状態にあるといえる。

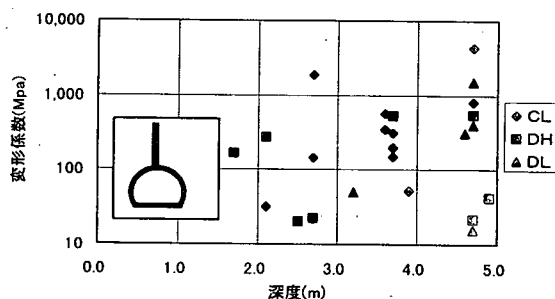


図-4 孔内水平載荷試験結果

2) 孔内弾性波速度

孔内弾性波速度はトンネル肩部で実施したボーリング孔内における速度検層により求め、深度毎の地山の弾性波速度を把握した。

図-5に試験結果を示す。これによると、岩質や破碎の状況が異なるために一概にはいえないものの、3~5m間で速度の上昇が見られる。前述の新線掘削時のデータでは3.6km/s程度が地山新鮮部と考えられるため、トンネル肩部におけるゆるみ範囲は壁面より3~5mであると推定される。

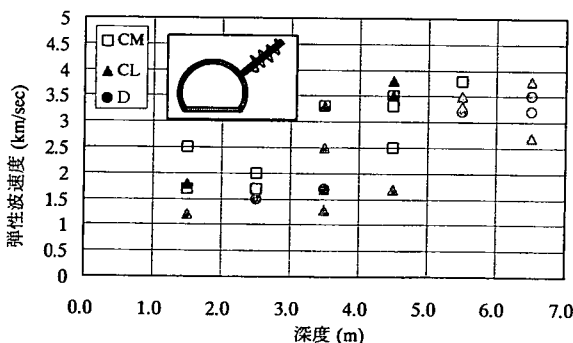


図-5 孔内速度検層結果図

3) 真空透気試験

真空透気試験は岩盤のゆるみの状況を亀裂性状に支配される岩盤の固有透過度を求めることにより調査する試験である。試験はボーリング孔内にダブルパッカーを挿入し、パッカー間の密閉区間から真空ポンプにより空気を吸い出し、その時の吸引流量および密閉区間内の圧力低下から試験区間周辺の岩盤の固有透過度を調査するものである。

試験結果を図-6に示す。試験実施時には既に改築のために覆工背面に注工が施工されていたため、各試験孔とも「注入区間（固有透過度が低い区間）」、「ゆるみ区間（固有透過度が高い区間）」、「非緩み領域（固有透過度がやや低い区間）」の3区間に分けられる。

4) 各種試験結果による緩み領域の推定

以上述べてきた各種試験結果より推定される緩み領域の範囲を図-7に示す。総合すると、

- ・天端部分では旧覆工面より8 m付近（真空透気試験より）
 - ・肩部方向では " 3～5 m付近（速度検層より）
 - ・側壁方向では " 4 m付近（真空透気試験より）
- がゆるみ領域であると推定される。

5. 拡幅工事における計測結果

1) A計測測定結果

図-8に内空変位および天端沈下の計測結果の縦断分布を示す。一般拡幅部での内空変位および天端沈下は4mm以下であるが、これに対し、非常駐車帯では内空変位・天端沈下ともに大きく8～16mmとなっている。

なお、35年前の建設当時の数十 cm 単位の変形に比べると極めて小さな値となっている。

2) 地中変位計測結果

B計測の一環として計測した地中変位計（一般型）の計測結果を図-9に示す。

一般拡幅区間では拡幅側で深度2 mまで1 mm 以下程度の変位で、壁面でも3 mm 以内であるが、非常駐車帯拡幅部では

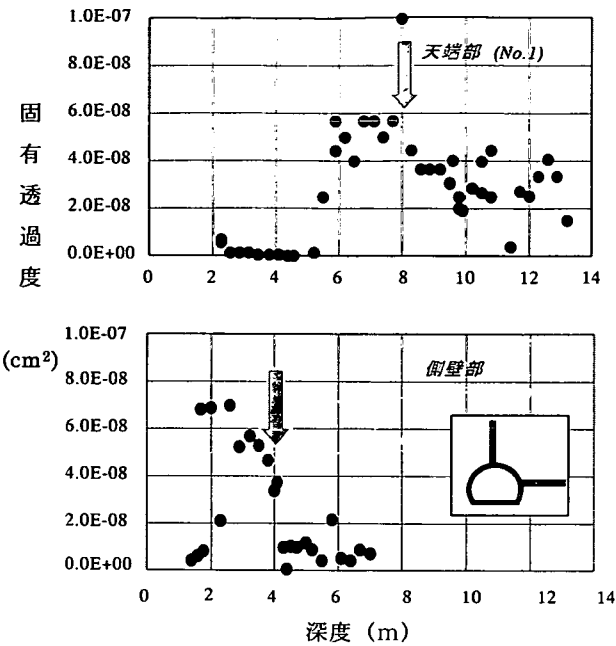


図-6 真空透気試験結果図

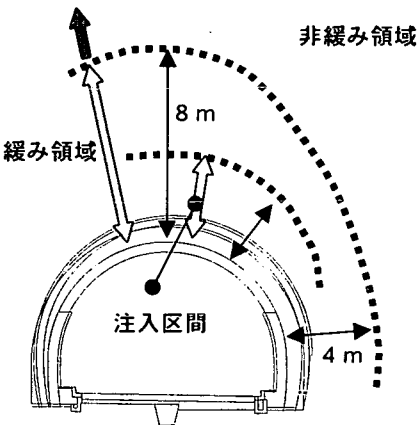


図-7 緩み領域の推定図

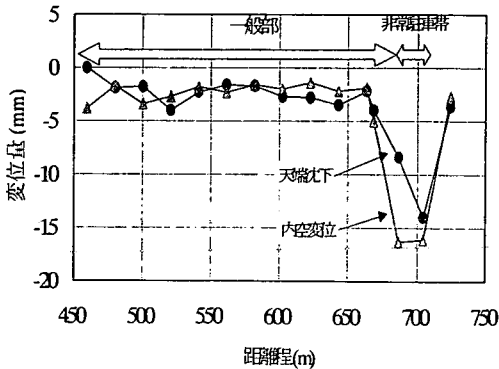
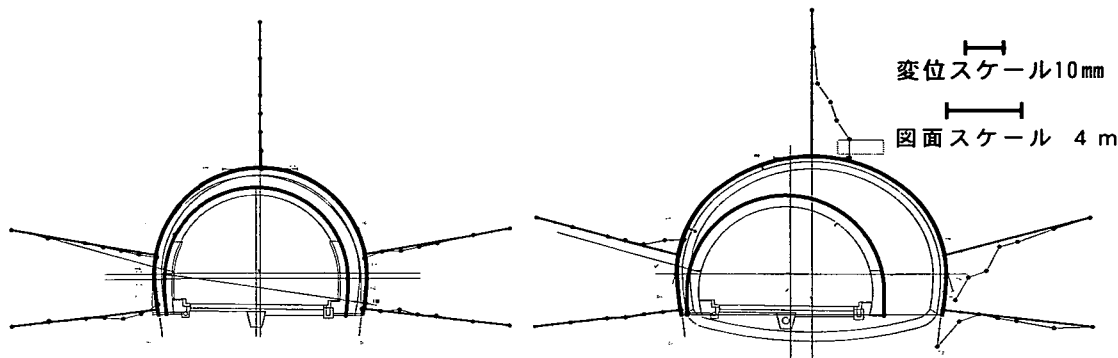


図-8 A計測結果図

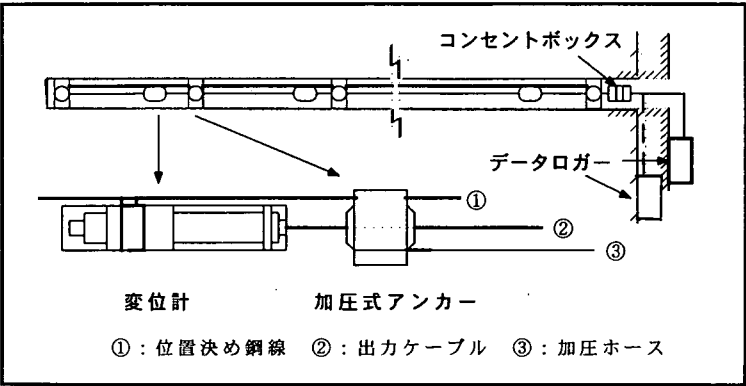
天端および拡幅側で4～5 m深度まで数 mm の変位が生じ、壁面では10～14mm の変位を生じている。



図－9 一般部と非常駐車帯拡幅部での地中変位計測結果

3) 設置型地中変位計測結果

本工事では拡幅工事であるために切羽通過前に地中変位計を埋設することが可能であった。そこで、先行変位まで計測することが可能な地中変位計を設置し、切羽通過前より変位を計測した。計測器の概要を図－10に示す。一般的な地中変位計では変位計が壁面に設置するフランジと一体化しているため、掘削を伴う連続的な変形計測は極めて困難であるが、埋設型地中変位計では変位計管自体が地中に埋設され、データロガーとは壁面付近のコンセントボックスを経由して接続されているため、掘削時のみ切り離し再度の接続が容易である。このため、TBM坑壁面から設置し拡幅時の地山挙動計測や、立坑底盤の掘削に伴うリバウンド計測などに利用されている。



図－10 地中区間変位計設置・計測概要図

表－1 変位計仕様

型 式	TBJ－50
測定範囲	50mm
定格出力	2000×10^{-6} st
非直線性	1.5%
推奨印加電圧	2～10V
入出力抵抗	350Ω
許容温度範囲	-30～80℃
過負荷	120%
重 量	約 1.5kg
ケーブル	外径 8mm、0.5mm ² 4 芯シールド
ボーリング径	φ86～100mm
測点数	1～6 測点

計測結果を図－11に示す。
計測結果によると、左右側壁に設置した変位計ではほとんど先行変位がなく、旧覆工が「長尺先受け」的效果をはたしていることが伺える。また、計測断面では左右の拡幅深さがほとんど同じにも関わらず、地質の相異により特徴的な計測結果となった。

砂岩（山側）
拡幅切羽上半通過時に壁面から1 mの区間で約 25mm の伸びが計測されたが、その後のクリープや下半通過時の変位増加はほとんどなく、キープブロックのすれ等、非弾性的な動きと推定される。

頁岩（谷側）

拡幅切羽上半通過後から変位が徐々に進行し深度 2 m までの区間で約 5mm の変位が計測された。下半通過時にも徐々に変位が増加し、最終的には 12mm 程度の変位となった。

地質の相異や表面のキープロック的な動きのあるものの、全体変位は深度 1～2 m までで内空変位に換算するとトータルとしても 40 mm 以下であった。これは 35 年前の施工時に数十 cm 単位の変形、鋼アーチ支保工の二重三重施工、覆工の二重施工が必要だった地山にしては小さな変形であった。

6. まとめ

以上にトンネル拡幅工事前の緩みに関する調査と拡幅工事中の変位計測結果を示したが、拡幅に伴う計測では、既設覆工取り壊し前からの変形挙動を計測しても、既設トンネル施工時の状況では想定できないような 5mm 以下の変形挙動しか生じなかった。

それに対して、非常駐車帯掘削時の変形量は比較的大きな変位が発生しており、緩んだ岩盤以深のグランドリングを切るような大きな掘削を行う場合には、大きな変位発生を招く恐れがあり、設計、施工には十分な配慮が必要であることを示唆している（図-12 参照）。従って、今後の増加すると考えられるトンネルの拡幅工事においては、事前のグランドリングの存在位置を調査する手法とそれを生かした拡幅計画が重要になるものと思われる。今回のプロジェクトで実施した真空透気試験や孔内速度検層はグランドリングの存在を調査する上で極めて有用であることがわかった。

参考文献

1) M. Kitada, K. Hayashida, S. Sakurai, S. Akutagawa, T. Sakamoto, Y. Okabe, M. Shinji:
Interpretation of deformational behavior and support mechanism of a 35 year-old tunnel subject to extensional excavation, ITA99 OSLO

2) 株式会社 東亜測器 技術資料：地中區間変位計（1孔多測点型區間変位計）

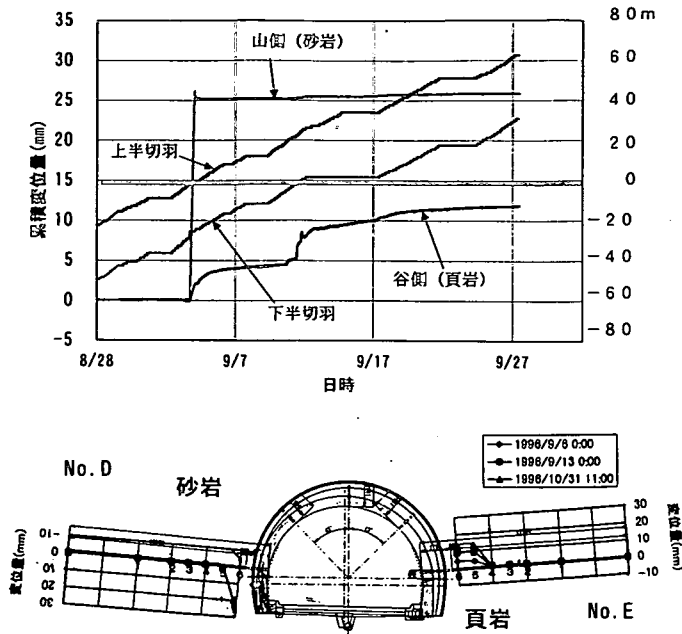


図-11 設置型地中変位計計測結果図

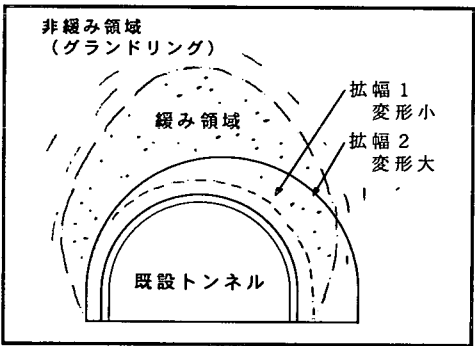


図-12 緩み領域・拡幅規模と変形の模式図