

南紀地区四万十帯のトンネル施工に伴う 地山挙動に関する研究

大阪大学[院] 谷本親伯, ○津坂仁和,
大成建設(株) 青木俊彦, 三菱重工業(株) 田島裕樹

A Study of Rock Behavior in Tunneling in Shimanto Belt, in Nanki Region

Chikaosa TANIMOTO, Kimikazu TSUSAKA, Toshihiko AOKI, and Yuki TAJIMA

1 緒 言

南紀地区四万十帯の頁岩地山において, 山岳トンネル施工時の変状が問題となった. 対象トンネルは2本の2車線高速道路トンネルである. また, 対象地区の四万十帯は, 付加体¹⁾の地質構造を成す. 付加体は, プレート沈み込みに伴う応力集中や海底地すべりなどにより, 著しい破碎作用を受けた泥質岩中に硬質な砂岩やチャート, 玄武岩類が取り込まれた岩石の構造となっており, また, 微小なき裂も著しく発達する. 筆者等²⁾はトンネル内で採取したボーリングコアと掘削ずりを用いて, スレーキング試験, 偏光顕微鏡観察, そしてX線回折分析を実施し, トンネルの変状と地質特性の関係を考察した. これに対して, 本論文では, トンネルの変状の原因をトンネル施工に伴うゆるみ域の発達に着目し, コンバージェンス計測結果と理論解析を用いて考察した.

2 トンネルの安定と地山アーチ

等方均質で初期地圧 p_0 が生じている地山に半径 a の円形トンネルを掘削し, 任意の内圧 p_i を発揮する支保工を建て込むと仮定した場合を考える. Fig.1(a)に示すように, トンネル周辺の応力状態は地山に初期地圧 p_0 が生じている一次応力状態から, 支保反力 p_i がトンネル壁面に均等に作用し, ひずみ軟化域が W_1 , 流動域が W_2 , あわせて幅 W_p なる非弾性域が形成された二次応力状態へと変化したとする. 同図において形成された非弾性域リングの一部分を切り取った図形 ABCD に作用する圧力および生じる応力の分布を Fig.1(b)に示す. 同図において, トンネル壁面には支保工による均等な圧力(支保反力) p_i がかかり, 一方, 弾性域と非弾性域の境界では半径方向の応力 $\sigma_{r(a+W_p)}$ と非弾性域内では接線方向に応力 $\sigma_{(\theta)}$ が生じる. 弾性域と非弾性域の境界に生じる半径方向の応力 $\sigma_{r(a+W_p)}$ は, 支保反力 p_i が変化しても一定であり, 弾性域と非弾性域の境界が変化することによってトンネルは安定状態に至る. このように, 非弾性域に分布する接線方向の応力 $\sigma_{(\theta)}$ が支持リングとしてアーチ作用を形成する. したがって, トンネルは, このアーチ応力と支保工による内圧 p_i によって, 弾性域と非弾性域の境界部分にかかる地圧から保持される. さらに, これまでの研究により³⁾, 形成される非弾性域として流

動域の生じていると, わずかな変化に対して大きな地山挙動が生じる. よって, トンネルの安定に対して本来許容される「ゆるみ」は, ひずみ軟化域および塑性流動域のうちひずみ軟化域に限られると考えられる.

3 ゆるみ域の発達と地山挙動

3.1 初期変形速度と断面変形率の関係 Fig.2にAおよびBトンネルの初期変形速度 dU/dL と断面変形率 $\Delta D/D$ の関係を示す. 初期変形速度 dU/dL は切羽が掘削径($D=11\text{m}$)の0.3倍(3.4m)進行した時点での変形量をその相対距離で除した値である. また, 断面変形率 $\Delta D/D$ は, 内空変位量 ΔD を掘削断面積に対し等価な円形断面の直径($D=11\text{m}$)で除した値である. トンネル掘削後, 計測断面と切羽面との相対距離が概ね一掘進長である2m以下の条件でその初期値が計測されたコンバージェンス曲線を用いた. Bトンネルでは主にショートベンチカット工法で施工され, ベンチ長が掘削径 $D=11\text{m}$ を超える場合は初期変形速度に下半掘削の影響が考慮されにくいため, 上半掘削断面積(57.61 m^2)に対する全掘削断面積(80.98 m^2)の割合によりその値を補正した. 各断面において, 谷本ら⁴⁾が提案する概念に基づいて, コンバージェンス曲線が掘削径 D を目安として切羽面と計測断面とのトンネル縦断方向における相対距離に対して, $2D$ 以内で収束した場合を地山が弾性挙動である断面と, 一方, $2D$ を超えた距離で収束した場合を地山に非弾性挙動が生じた断面と分類した. 同図において, AおよびBトンネルで計測された初期変形速度 dU/dL と断面変形率 $\Delta D/D$ の関係は, 谷本ら⁵⁾によって提案されたトンネル地山分類(以下, 変形に基づく地山分類と称する)と良い相関関係にある. また, 初期変形速度 dU/dL

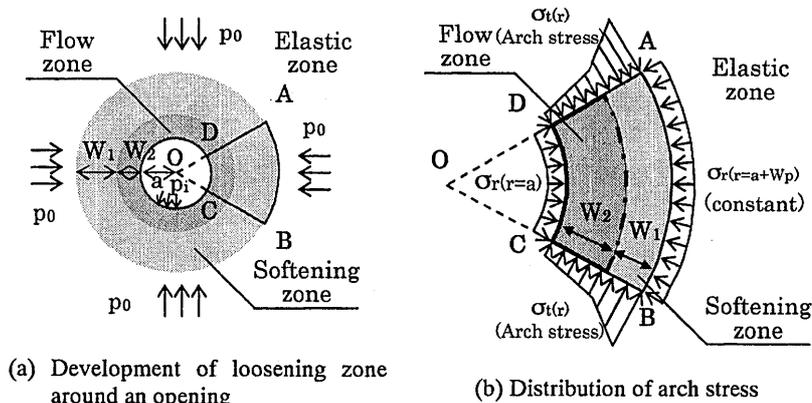


Fig.1 Meaning of loosening zone around an opening and ground arch effect

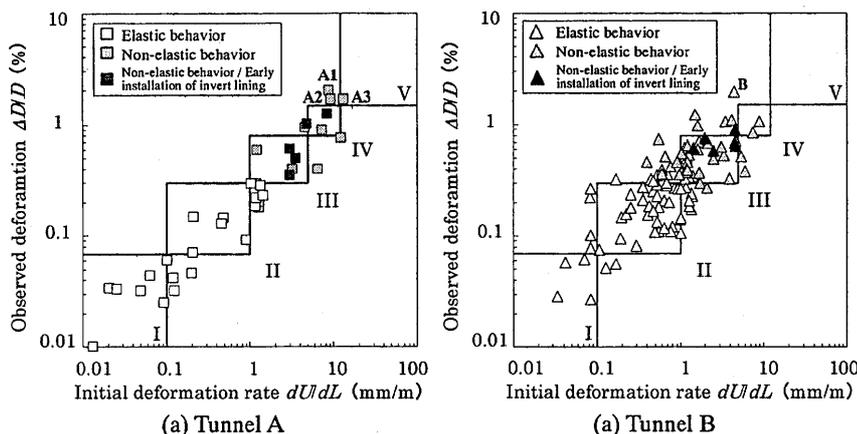


Fig.2 Relationship between observed deformation $\Delta D/D$ and initial deformation rate dU/dL

が 1mm/m, 断面変形率 $\Delta D/D$ が 0.25-0.30%を超えると, トンネル周辺にゆるみ域 (非弾性域) が発達すると考えられる。

3.2 ゆるみ域の発達と許容変形量の関係 Fig.2 において変形に基づく地山分類の Class IV と V に分類される多くの断面で再掘削が必要となった。そこで, それらの断面の中で断面変形率 1.5% 以上の変形が生じた 4 断面 (Fig.2 に示す断面 A1, A2, A3, B) における施工に伴うゆるみの発達をひずみ軟化を考慮した理論解析³⁾を用いて考察する。これら 4 断面の平均断面変形率は約 1.8%, コンバージェンスの収束する切羽距離に基づくゆるみ域の幅は 4.5-7.0m, 実施支保パターンは旧日本道路公団の標準支保パターン⁶⁾の CII または DI であり, 谷本らの方法⁵⁾に基づいて算出される支保反力 p_s は 0.25-0.30MPa である。これらの値を推定パラメータとして, パラメトリックスタディにより入力物性値を決定した。その結果, 静水圧の初期応力 $p_0=1.43\text{MPa}$ (土被り厚 $H=55\text{m}$, 単位体積重量 $\gamma=26\text{kN/m}^3$), トンネル半径 $a=5.5\text{m}$, 弾性係数 $E=172\text{MPa}$ ($E=200q_u$), ポアソン比 $\nu=0.3$, 一軸圧縮強度 $q_u=0.86\text{MPa}$ (地山強度比 $C_f=0.6$), 内部摩擦角 $\phi=15^\circ$, 残留強度 $q_u'=0.34\text{MPa}$ ($q_u'=0.4q_u$), 残留内部摩擦角 $\phi'=9^\circ$ ($\phi'=0.6\phi$), そして, 地山の脆性を示す軟化の傾き $\omega=69\text{MPa}$ ($\omega=0.4E$) となった。これらを用いて求めた特性曲線を Fig.3 に示す。同図より, 対象とした断面では, 変形が収束した時点において, 非弾性域 W_p が 6.8m, このうちひずみ軟化域 W_1 と流動域 W_2 がそれぞれ 3.9m, 2.9m 程度発達する結果となる。また, 切羽が計測断面を通過する際には, 既に非弾性域 W_p が 3.9m, このうちひずみ軟化域 W_1 が 2.4m, 流動域 W_2 が 1.5m 発達する。そして, 切羽が計測断面を通過してから変位が収束するまでの内圧変化は, わずか 0.11MPa である。つまり, 非弾性域 W_p の発達, 特に流動域 W_2 の発達により, わずか 0.11MPa のトンネル壁面の内圧低下が約 1.8% (100mm) の壁面変位と約 3m の非弾性域の発達に代替されトンネルが安定したと考えられる。また, 流動域の発生を抑制するための壁面変位量は 64mm であり, 40-50%の先行変位率を考慮した現場内空変位量は 64-77mm (断面変形率

は 0.58-0.70%) である。以上より, これら 4 つの断面周辺では, 掘削初期段階に地山を過度に緩ませ, 流動域を大きく発達させたことが変形の主要因であると考えられる。一方, Fig.2 に濃い灰色で示される断面は, 掘削後切羽が 1D 進行するまでにインバートにより断面閉合が行われた。その結果, 大きな変形が生じた 4 つの断面と同程度の初期変形速度を示すにもかかわらず, 断面変形率を許容変形量である 0.7% 前後に抑えられている。よって, インバートによる早期断面閉合が適切に地山のゆるみを抑制するための有効な手段であると考えられる。

4 結 言

南紀地区四万十帯の頁岩地山に掘削され, 大きな変形が生じた 2 つのトンネルにおいて, その変形原因をトンネル掘削に伴うゆるみの発達に着目して考察を行った。その結果として, 掘削初期段階において地山を過度に緩ませたこと, 特に流動域の発達させたことが変形の主要因と考えられる。また, 大きな初期挙動を示す断面において, インバートにより断面を早期に閉合することが, 掘削に伴う地山のゆるみを適切に抑制し, 許容変形量以内に变形を収束させる有効な手段であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本地質学会地質基準委員会, “地質基準”, 3 章 (2001) 共立出版(株)。
- 2) 谷本親伯, 青木俊彦, 田島裕樹, 岩田修一, 舛屋直, 津坂仁和, 材料, **53**, 447 (2004)。
- 3) 谷本親伯, 嶋昭治郎, 土木学会論文報告集, 325, 93 (1982)。
- 4) 谷本親伯, 吉岡尚也, 材料, **40**, 630 (1991)。
- 5) 谷本親伯, 吉岡尚也, 材料, **41**, 424 (1992)。
- 6) 日本道路公団: 設計要領 第三集 第 9 編トンネル (1985)。

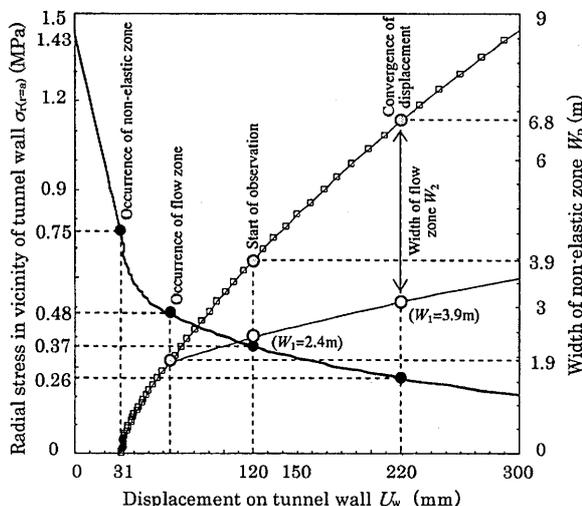


Fig.3 Support-and-ground interaction curve