

# 付加体頁岩中で発生した、トンネル掘削後の 割れ目によるゆるみの性状

## Investigating the loosened zone due to fractures caused by the tunnel excavation in the shale of accretionary prism

田中崇生<sup>1)</sup>、古谷栄治郎<sup>2)</sup>、石井正之<sup>2)</sup>

Takao TANAKA<sup>1)</sup>・Eijiro FURUTANI<sup>2)</sup>・Masayuki ISHII<sup>2)</sup>

Ground composed of an accretionary prism was found in prior investigation to have a seismic velocity of over 4.0km/s and a compressive strength of over 20MN/m<sup>2</sup>. However, the falling of rocks from the tunnel cutting face is a frequent occurrence and inside, the displacement of the tunnel was large during the excavation. In terms of typical mechanical properties of the ground, composed of an accretionary geological system in the excavation of the tunnel, ground behaviour was described as follows :

1. In the excavation of the tunnel, seismic velocity decreased from 4.0km/s to under 2.0km/s around the tunnel.
2. Modulus of elasticity after the excavation dropped 20% ; in other words, the competence factor reduced from 30 down to less than 4.

To account for these analyses, it is thought that the particular micro structure based on pressure-solution cleavage in Thrust Fault complex was revealed because of the stress release in the excavation of the tunnel.

In conclusion, according to past investigation methods, it is too hard to predict the collapse in excavation due to stress dependency of an accretionary geological system.

**Key words :** accretionary prism, tunnel excavation, pressure-solution cleavage, fracture, seismic velocity

### 1. はじめに

付加体とは、大陸縁辺における海洋プレートの沈み込みに伴う付加作用によって形成された地質体であり、紀伊半島では図-1に示すように中央構造線に沿って帯状に分布する。付加体の地質は、陸側に付加される際に生じる何本もの衝上断層による覆瓦構造と、内部が破碎、混合された混在岩(メランジ)やオリストストロームと呼ばれる複雑に累重した地質で構成されることが特徴である。

一方、その工学的特徴として、自然の状態では高い弾性波速度と、硬岩相当の物性を示すことが知られている<sup>1)</sup>。しかし、トンネル施工時になると状況は一変し、切羽の小崩落が絶えず、補助工法なしに掘削することが困難となる場合が多い<sup>2)</sup>。近年では、このような付加体地質掘削時の切羽観察や計測変位の解析を基に各岩種毎の変形特性も明らかとなりつつあるが、ゆるんだ地山の実態を詳細に報告した例は少なく、事前調査へのフィードバックは十分とはいえない。本文では、このような付加体地質中の頁岩の、トンネル掘削時の地山の応答とゆるみの性状について報告する。

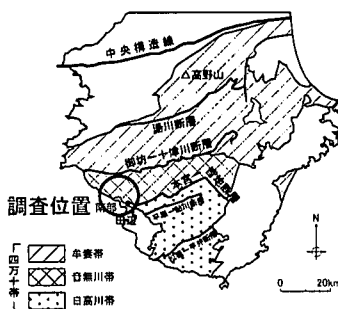


図-1 調査位置図

1) 日本道路公団 関西支社

2) 明治コンサルタント(株) 大阪支店

## 2 事前調査と施工時の乖離

高田山トンネルの地質は、頁岩を主体とし一部砂岩を挟在する古第三紀層の瓜谷層である。本地質は、付加体堆積物中のいわゆる広義のメランジ帯に属する。岩石としての密度が大きく間隙率が小さいため、事前調査での弾性波速度は3～4km/secを示し、一軸圧縮強度も20MN/m<sup>2</sup>以上(最大80MN/m<sup>2</sup>)と中硬岩以上の物性を示したことから、当初はB～Cクラスの地山と考えられていた。しかし、施工に入ると不良地山状態が続き、各種の補助工法を併用した施工が行われた。

## 3. 構成地質の特徴と切羽の状況

図-2は、施工中に実施された高精度屈折法弾性波探査結果であり、掘削地山の弾性波速度は4km/sec層が主体である。一方、図-3は、事前調査では想定困難であった断層の傾き、層内褶曲の状態を、再踏査と切羽観察結果を基に修正した地質構造図である。百～数十メートル毎に衝上断層で区切られた北落ちの覆瓦構造を示すこと、しかしながら衝上断層間の地質は傾斜、方向ともに数十メートル単位で変化し、時に構造が逆転する場合もある乱れた構造を示す状態などが明らかとなった。また、断層の性状はシャープな面を持つものではなく、鏡肌が集中するゾーンでかつ低角であることから、施工中は断層というよりも脆弱な区間として認識される。

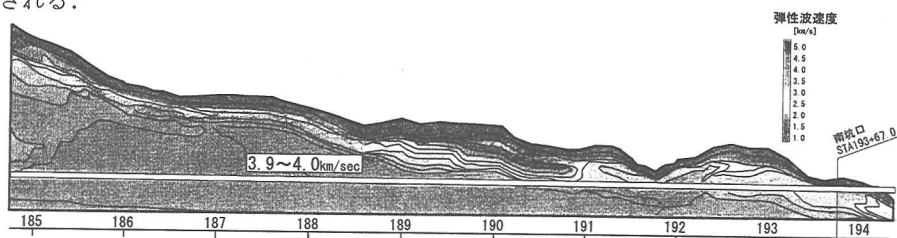


図-2 高精度弾性波探査結果

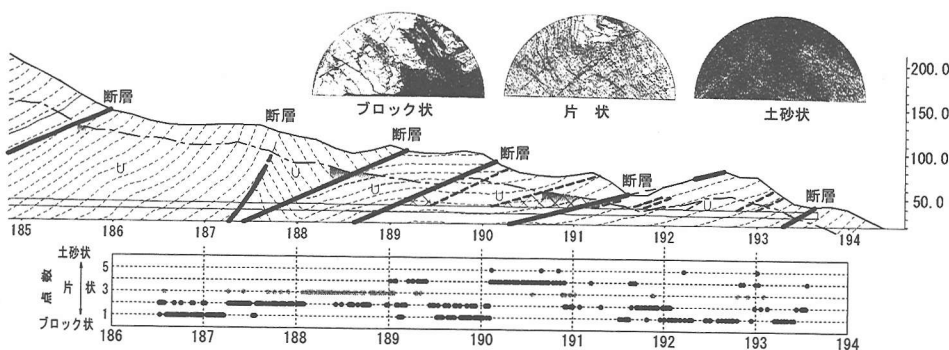


図-3 トンネルの地質構造と切羽の割れ目パターン

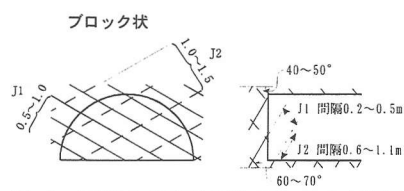


図-4 切羽の代表的割れ目の方向と間隔

また、図-3には切羽観察記録を基に、出現する地質を「ブロック状」「片状」「土砂状」の3つのパターンに模式的に区分し、観察位置に点数化してプロットすることで、切羽の地質の移り変わりを示した。これらのパターンは、内空変位や縫い返しなどの現象とは必ずしも一致しないが、切羽崩落箇所とは密接に関係し、特に土砂状～片状を示す区間は規模の大きい衝上断層付近に集中

する傾向がみられた。本頁岩には、明確な層理面の発達とは認められず、これらの地質構造を規制するのは、マクロ的にはこれらの衝上断層群であり、ミクロ的には付加体形成時に生じた圧力溶解劈開と呼ばれる岩石構造である。図-4には、ブロック状部での代表的な割れ目の方向や平均的間隔を表したが、このうち J1 が

岩石のマイクロ構造に沿う方向である。切羽での崩落は、このような割れ目に規制されて発生する。切羽の前方弾性波探査結果によれば、もともと  $4\text{km/sec}$  前後の地山弾性波速度が、切羽の接近とともに急速に低下して切羽直前方では  $2\text{km/s}$  以下に、場所によっては  $1\text{km/s}$  以下にまで低下する区間がある。このような切羽地質の速度低下は、トンネル掘削によって潜在的な割れ目が顕在化した結果とみることができる。

#### 4. ゆるみ部の物性

##### (1) 弾性波速度の低下領域

トンネルとほぼ平行に打設した2本のボーリング孔において、掘削が1D進行するごとにP波速度検層( $1\text{m}$  間隔)を実施し、速度低下領域の広がりを見た。本区間では、トンネル直近の2～2.5m間の速度低下が特に著しく、 $4\text{km/sec}$  の速度層は  $2.0\text{km/sec}$  以下にまで低下している。また、2.5mから約10m程の間は、切羽の進行とともに低下し、 $4\text{km/s}$  層はトンネルに向かって漸移的に  $2.0\text{km/sec}$  にまで低下する。しかし、速度の低下領域はトンネルよりおよそ10m以深には及んでいないことも確認できた。

因みに、本区間での上半内空変位はおよそ  $18.0\text{mm}$  であった。

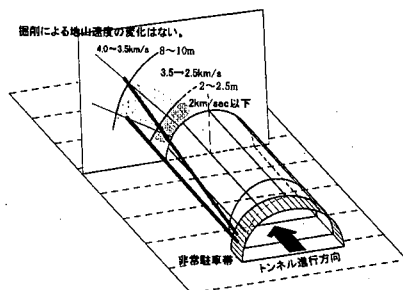


図-5 トンネル側方弾性波速度の低下

##### (2) 弾性波速度が低下した領域の物性

トンネル掘削後の地山の物性変化を、ボーリングによるコア観察、孔内水平載荷試験、P波検層およびボアホールスキャナー(BHS)によって確認した。本調査区間の割れ目の状態は、ブロック状～片状部に該当する。本区間での初期変位速度は  $-29.0\text{mm/日}$ 、上半内空変位は  $121.2\text{mm}$  に達した。

ボーリングコアのRQDは、トンネル外周の8m程までの間は割れ目が発達し0%であるが、それより奥の8～10m以上になると平均して40%前後となり、CM～CH級の性状を示す。

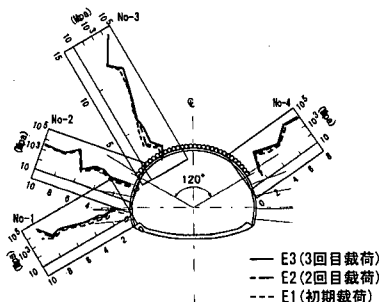


図-6 孔内水平載荷試験結果

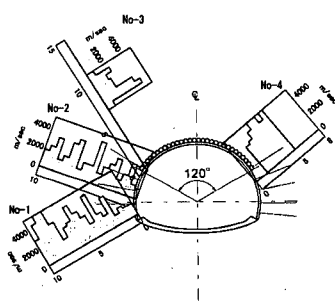


図-7 P波検層結果

図-6は、孔内水平載荷試験結果である。試験は、 $1.0\text{m}$  間隔で実施した。最終弾性係数(E3)は、トンネルから約10m以上離れた健全部では  $1\text{GPa} \sim 10\text{GPa}$  であるが、トンネル近傍では  $0.1\text{GPa}$  まで低下している。これに対し、同じボーリング孔で行ったP波検層では  $3.0 \sim 4.0\text{km/sec}$  の高速度部と  $1.0\text{km/sec}$  の低速度部が  $1.5 \sim 2.5\text{m}$  間隔で交互に繰り返す不規則な分布を示す。この間隔は、ボアホールスキャナーや切羽観察地質でみられる割れ目の間隔や掘削ブリの大きさに近いが、速度とコアの状態は対応せず、原因は不明である。

一方、コアによる一軸圧縮試験及びP波速度試験結果と孔内水平載荷試験及びP波速度検層結果をもとに、速度と弾性係数の関係をプロットしたのが図-8である。初期載荷による変形係数(E1)、最終載荷時の接線弾性係数(E3)と一軸圧縮試験から求めた弾性係数( $E_{50}$ )は、それぞれP波速度と比較的よい相関を示す。本図から、健全な岩石部分の弾性係数は、岩石試験、孔内水平載荷試験結果ともに  $5\text{GPa}$  以上であること、しかしながらP波速度が  $4\text{km/s}$  から  $2\text{km/s}$  に低下すると、弾性係数はおよそ  $1/10$  に低下することなどが読み

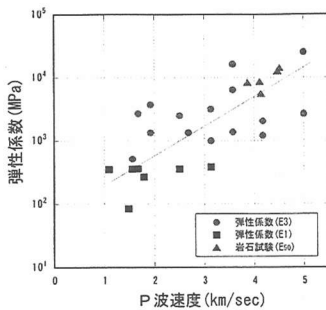


図-8 P波速度と弾性係数との関係

### (3) 地山強度比

弾性波探査結果と調査結果を基に、準岩盤強度( $G_{qu}$ )に対する地山強度比( $\alpha$ )を試算した。

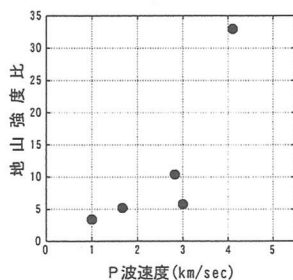


図-9 P波速度と地山強度比との関係

$$\alpha = G_{qu} / (\gamma \cdot h) \quad \dots \dots (1)$$

$$\text{ここに, } G_{qu} = (v_p / V_P)^2 \times q_u$$

$\gamma$ : 単位体積重量 (0.0023kN)

$h$ : 土被り高さ (5500cm)

$V_P$ : 供試体のP波速度

$v_p$ : 地山のP波速度

$q_u$ : 供試体の一軸圧縮強度

地山の P 波速度は 1.0 ～ 3.0km/sec, 供試体の速度は 3.8 ～ 4.5km/sec であった。岩石の一軸圧縮強度は 19 ～ 90MN/m<sup>2</sup>(平均的には 20 ～ 40MN/m<sup>2</sup>)であり, 地山強度比は 3 ～ 10 となった(最も良好な部分では 30)。ばらつきの原因は, 図-7に示した不均質な P 波速度によるものである。一方, 図-9は調査地点での土被り厚を基に, 地山強度比と P 波の関係で整理したものである。本図から, P 波速度が 1.5km/sec 以下になると地山強度比は 4 を切るようになり, 1.0km/sec 以下では 2 以下となることが想定される。実際, 本地点では切羽の小崩落が激しく, 内空変位も大きかった。

## 5. ゆるみ部の割れ目状態

### (1) 割れ目の形態と成因

ボアホールスキャナー(BHS)による観察で特徴的なのは, 頁岩中にみられる岩石構造(圧力溶解劈開)である。これは, 付加時の影響によって頁岩中に刻み込まれた劈開構造であり, 瓜谷層頁岩中に普遍的に認められる(写真-1)。これらの, ミリメートルオーダーの網目状構造の主方向は北落ちであり, すなわち地質構造

| 名称               | 割れ目パターン | 特徴                                          |
|------------------|---------|---------------------------------------------|
| 開口割れ目 (J1)       |         | 孔の全周を切り、開口する割れ目。(圧力溶解劈開の構造方向とほぼ一致する。)       |
| 開口割れ目を切る割れ目 (J2) |         | ①の割れ目を、低角あるいは高角で斜交して切る割れ目。(点線は、圧力溶解劈開の構造方向) |

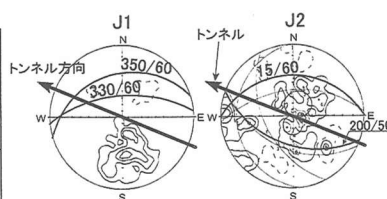


図-10 BHSで見られる割れ目区分とステレオ図

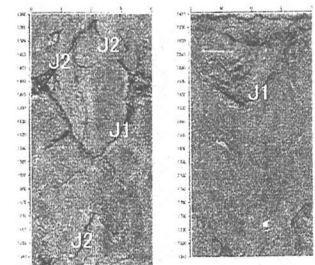


写真-1 BHSで見られる劈開と割れ目

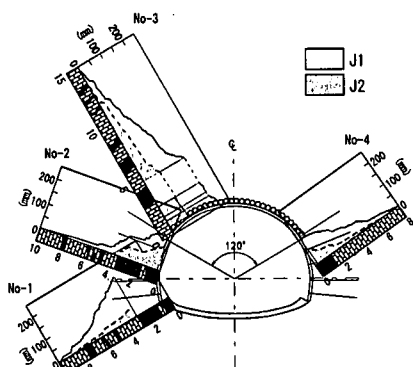


図-11 J1とJ2の累積開口分布

## (2) 割れ目の分布と変形のメカニズム

BHS と切羽観察結果，それに物性の低下状況から想定される，本地山のゆるみ発生メカニズムは，次のようなものである．すなわち，頁岩中に存在する潜在的な不連続面が，掘削に伴う変形によって開口，滑動することで，トンネル外周のせん断破壊が進行する．潜在割れ目の主方向は，圧力溶解劈開方向である．膨張性泥岩の挙動と異なる点は，その進行がある大きさのブロック化によって進行することである．このようなメカニズムを確認する目的で，不連続体解析による定性的な検討を行った．割れ目のモデルは，図-12を基にクラスタリングを行い，観察結果も考慮して，表-1に示す上位2方向を抽出した．

表-1 モデルに用いた割れ目

|    | 代表方向   | 投影角度(°) | 長さ(m) | 間隔(m) |
|----|--------|---------|-------|-------|
| J1 | 350/30 | -35     | 全領域   | 1.0   |
|    | 330/60 | -52     | 全領域   | 1.0   |
| J2 | 200/50 | 45      | 5.0   | 1.5   |
|    | 15/60  | -20     | 5.0   | 1.5   |

- 最大傾斜方向角度／傾斜角度(Nを0とする。)
- 初生構造は，最も目立つ方向のみを記載。
- トンネル断面への傾斜の投影は水平右を0°とし反時計回り

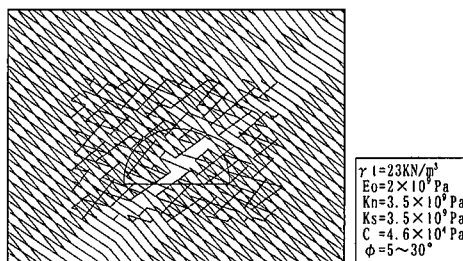


図-12 解析モデルと入力パラメータ

割れ目の分布は，圧力溶解劈開方向である J1 については全領域とし，ゆるみによって発生したと考えられる J2 の領域は孔内水平載荷試験の結果をもとに決定した．また，間隔は BHS の観察結果を参考に，モデル作成の容易さや計算速度等を勘案して決定した．作成モデルは，図-12に示すように，全体に潜在的な初生割れ目である J1 が分布する中，トンネルの 5 ～ 8m 外周に，掘削によって生じた割れ目である J2 が共存するものとなる．このモデルにおいて，割れ目 J1 と J2 に，それぞれ異なったせん断抵抗角を設定し，表-2に示す条件で割れ目がトンネルの変形に与える影響をみた．検討は，変位ベクトルと接線方向の接触力がゼロとなった範囲が集中した部分に着目して行った．結果を図-13に示す．

表-2 検討ケース

|    | ケース 1       | ケース 2       | ケース 3       |
|----|-------------|-------------|-------------|
| J1 | $\phi = 30$ | $\phi = 30$ | $\phi = 5$  |
| J2 | $\phi = 30$ | $\phi = 5$  | $\phi = 30$ |

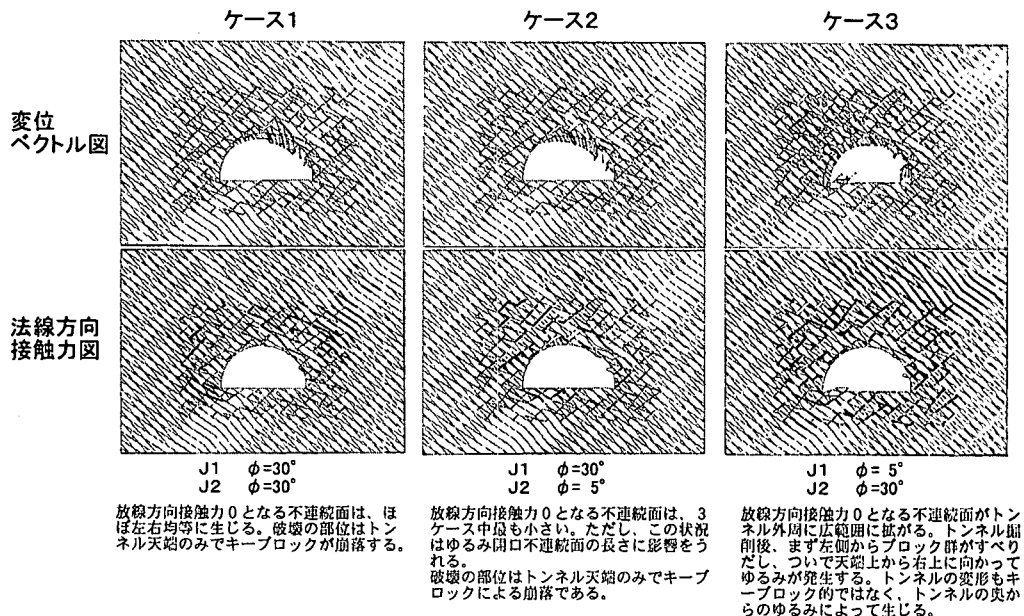


図-13 J1とJ2のせん断抵抗角を変化させた場合のモデル解析結果図

図-13は、上が変位ベクトル図、下が法線方向接触力図であり、下図の太線部分が接触力がゼロとなった部分を示す。検討結果は、ケース 1、ケース 2、すなわち地質構造方向の J1 が高いせん断抵抗角を持つ場合はキーブロック的な挙動となり、ゆるみ範囲も小さい結果となった。ただし、ケース 1 は、ケース 2 に比べて、法線方向接触力がゼロとなる割れ目が J1 に集中する傾向があり、トンネル掘削直後のゆるみは、J1 から始まった可能性を示唆している。一方、ケース 3 では、J1 のせん断抵抗角を低く見積もることによってゆるみが広範囲に広がり、地質構造方向のスリップを呼び起こすとともに J2 は開口し、トンネルに向かって岩塊が押し出す。この結果は、観察される現象に近いものである。実際には、この後、トンネル近傍での力の再配分の段階へ進み、さらにせん断破壊が進むものと考えられる。

## 6 まとめ

トンネル施工中の切羽観察と掘削後の調査によって、地山のゆるみ部の性状と物性を明らかにし、そのメカニズムを潜在割れ目の顕在化という見地から説明した。自然状態では硬岩クラスの特徴を示す付加体の頁岩は、衝上断層の発達というマクロな構造と、圧力溶解劈開というミクロな構造の発達により、破砕質な層状岩盤の地山として挙動する。トンネル掘削の結果、4km/sec の地山弾性波速度は 1/2 ~ 1/4 以下に急速低下し、健全部では 10 以上であった地山強度比も 2 以下となる。このような付加体頁岩の応力依存性を、従来の調査、試験法によって予測することは現段階では困難である。今後は、本結果を基に同様の事例を収集し、事前調査における割れ目の捉え方、事前予測への反映方法等について、検討を進める必要がある。

1) 中田, 西村: 岩石ごとの地山挙動に関する研究, トンネルと地下 1998.1

2) 竹林, 三上, 國村, 奥井: 山岳トンネル工法における岩盤の強度定数と内空変位の関係に関する事例研究, トンネル工学研究論文報告集, 2001.11