

# 付加体からなる岩盤の地質予測手法

## Study of Geological Prediction Method Based on the Observation of Construction Sites at the Accretionary Complex

山本 俊夫\*1

齋藤 泰信\*2

宇都宮 徳生\*2

Toshio Yamamoto

Yasunobu Saito

Tokuo Utsunomiya

### 要旨

日本地質学会が規定した地質基準では、日本列島の基盤岩類を、6つの地質体(正常堆積物、付加体堆積物、火山岩、深成岩、変成岩、特殊地山)に大別することが提案されている。この区分は、岩盤構造物と基礎の地質との体系化に都合よく分類されている。筆者らは、過去の地質工学的問題解決に携わった施工事例を整理し、新しい観点で地質解析を行い、岩盤構造物対象工事での安全で経済的な施工技術ツールおよび総合評価方式での技術提案資料となるデータベースの構築を目指している。本報告では、各地質体の中で特に日本列島の大部分を占める「付加体」について、過去の事例を基に地質工学的問題点を抽出し、施工中の焼坂第二トンネルで実証した事例を紹介し、付加体に対応した地質予測手法の提案を試みたので紹介する。

キーワード：地質基準 地質体 付加体 地質予測 ステレオ画像

## 1. はじめに

最近、日本地質学会が規定した地質基準<sup>1)</sup>では、日本列島の基盤岩類を、6つの地質体(正常堆積物、付加体堆積物、火山岩、深成岩、変成岩、特殊地山)に大別することが提案されている。この区別は、岩盤構造物と基礎の地質との体系化に都合よく分類されている。

過去の地質工学的問題解決に携わった施工事例を整理してみると、約半数以上が付加体と呼ばれる地質体に位置するものであった(図1参照)。さらに、断層破碎帯と認識していたものの大半が、泥質岩からなる基質部分が顕著なせん断変形を被って著しく脆弱となった部分であった。

図2は、1982年、和歌山県すさみ町で施工された獅子目トンネル工事において遭遇した断層破碎帯の地質構造図である。当時、破碎帯と判定された地質は、現在の地質学的見地では、付加体に特有な、脆い黒色の泥質基質部分であったと想定される。

本報告では、「付加体」について、地質工学的問題点を抽出し、付加体に対応した地質予測手法の提案を試みた。すなわち、過去の施工例を整理し、今まで培った経験を生かして付加体からなる岩盤の地質特性と工学的諸問題についてまとめ、現在施工中の焼坂第二トンネルで実証した事例を紹介し、付加体からなる岩盤構造物対象工事での安全で経済的な施工技術ツールおよび総合評価方式での技術提案資料となることを確認した。

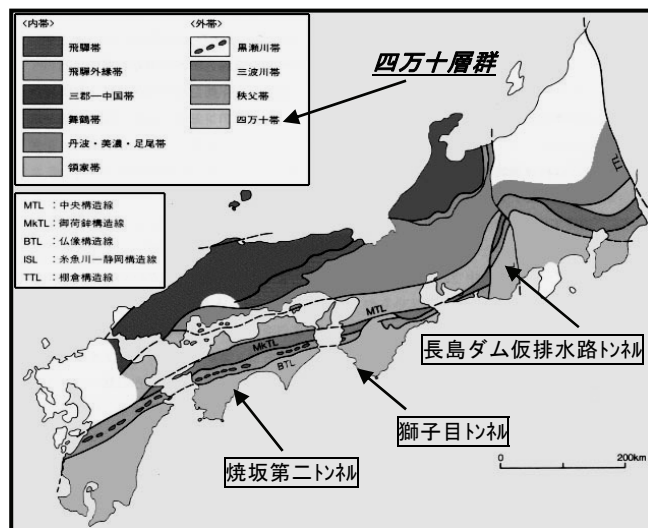


図1 日本列島・西南日本の地質体区分<sup>2)</sup>と施工事例 (藤田, 2002をもとに一部加筆)

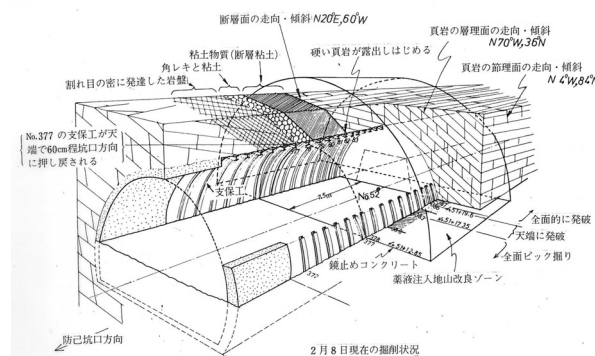


図2 断層に遭遇した獅子目トンネルの地質構造

\*1 技術研究所 土木・環境技術研究部門

\*2 大阪本店 土木部

## 2. 付加体の地質工学的特性

### 2.1 付加体の地質学的特性

西南日本外帯は、図1に示したように東西帯状の配列によって特徴づけられる。その内、付加体からなる地質体は、「秩父累帯」、「四万十帯」及び「丹波・美濃・足尾帯」である。30数年前までは、それらは、古生代～中生代の「地尙斜」と呼ばれて、現在の場所に位置していた仮想的な堆積盆において形成されたとみなされてきた。ところが1970年代に、「プレートテクトニクス」という新しい地球観の登場によって、それまでの学問体系が覆された。すなわち、日本列島の地質構造については、プレート運動によって次々と海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む際に、海洋プレートの一部が剥ぎ取られて陸側プレートに付け加わることにより、衝突・付加して形成される寄せ木細工のように集積した「付加体」が、段階的に日本列島を成長させていることが次第に明らかとなってきた。以上の付加体形成の造構過程を模式的に示したのが、図3<sup>3)</sup>である。

したがって付加体を構成する地層は、岩相の上から大きく粗粒碎屑岩相とメランジュ相の2つに分けられる。粗粒碎屑岩相は、様々な量比で互層する砂岩と泥岩からなる。メランジュ相は、泥質岩を主体とし、その基質中に種々の年代を有する多種類の岩層(砂岩・砂岩/泥岩・緑色岩類・チャート・頁岩・石灰岩など)が、大小のブロックとして含まれる地質体をいう。

### 2.2 付加体の地質工学的特性

メランジュ相が分布する領域では、岩層の側方への連続性が悪く岩相の変化が激しいため、地表踏査やボーリングのデータから地下の地質状態を推定する場合や、トンネル掘削中に前方の地質の状況を把握する場合に、困難を伴う。また、物性を著しく異にする岩石種が大なり小なり、せん断されて脆弱な泥質岩中に混在することから、施工上、注意を要する地質状態である。とくに泥質岩基質が顕著なせん断変形を被って著しく脆弱となり、切羽の崩壊や斜面崩壊などの素因となることが多い。

したがって、このような地質体が分布することが判明した場合には、事前に十分な調査を行い綿密な対策工を考慮した上で、細心の注意をはらって工事を進める必要がある。

一方、付加体でも粗粒碎屑岩相の場合は、基本的には整然層で構成され、これらの岩相が分布する領域では地層の連続性は基本的にはよいことから、地質状況を把握するのは比較的容易で、土木地質的には、より脆弱な泥質岩の優勢な岩相が広く分布する部分、風化帯および変質帯、断層破砕帯あるいはせん断帯に注意を払えばよいことになる。

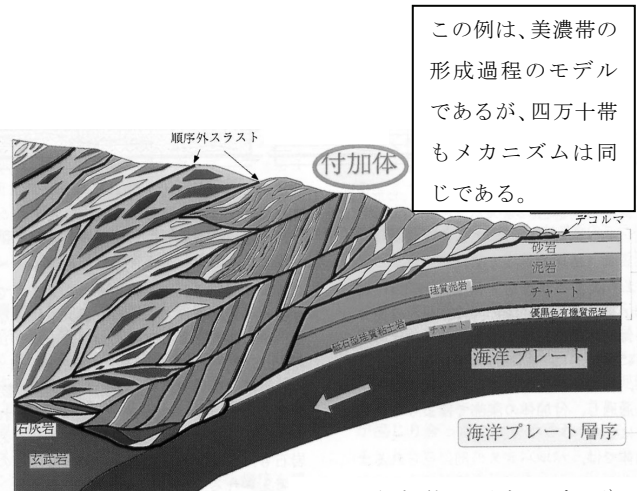


図3 付加体の形成モデル<sup>3)</sup>  
(日本地質学会, 2000より引用)

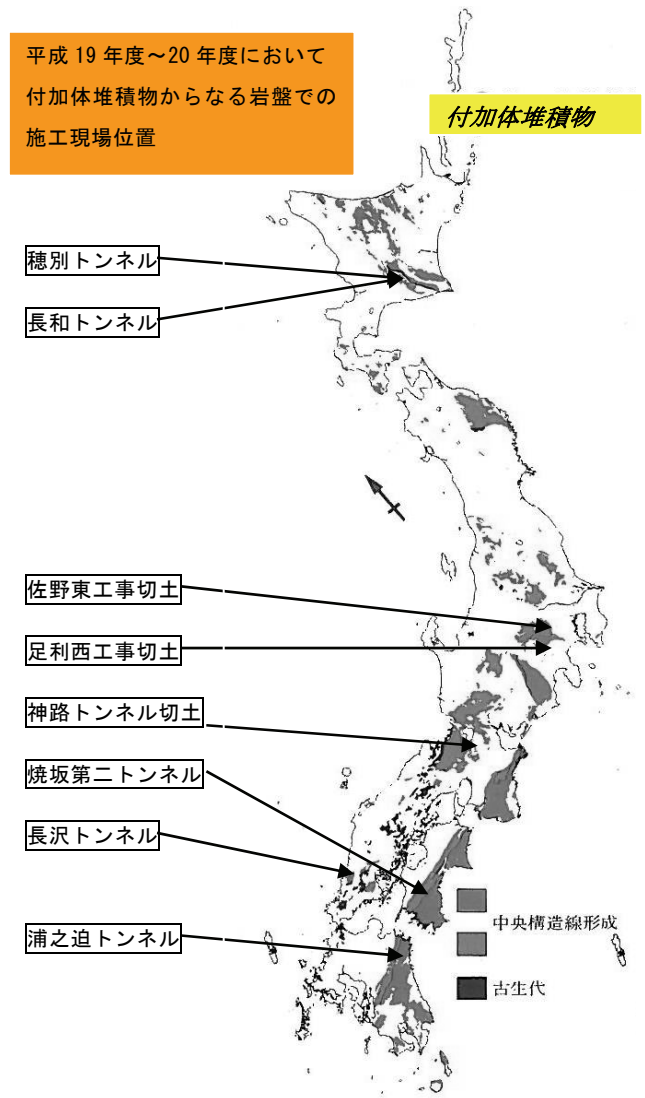


図4 日本列島における付加体堆積物の分布<sup>1)</sup>  
(日本地質学会地質基準委員会, 2001を基に一部加筆)

### 3. ステレオ画像記録に基づいた地質解析例

この事例は、地質構造の複雑な付加体で掘削したトンネル工事において、ステレオ画像記録による地質構造の実態解明に成功した最初の例である。このトンネルは、1989年、静岡県の大井川上流の長島ダム建設において仮排水路として施工されたものである。切羽および側壁の150mの連続観察記録をする機会があり、付加体特有の複雑な地質構造を明らかにすることができた(当時は付加体の概念が地質工学分野には十分に認識されていなかった)。

#### 3.1 設計段階での地質構造の想定

対象トンネルの岩盤は、設計時点での地質縦断図(図5)によると、四万十累層群に属し、大局的には成層した砂岩、粘板岩、砂岩粘板岩互層からなると想定されていた。

#### 3.2 地質構造に起因した崩落

上半掘削施工中において、図5中に記した「天端崩落箇所」にて掘削終了数日後に予期せぬ天端から岩塊の崩落が発生した。この崩落の原因は、砂岩層は堅固にもかかわらず、その間に挟まる粘板岩はせん断が著しく、そのため岩層境界面がすべり易い状態となっていたことにあると判断された。さらに、掘削による応力開放とその境界面への湧水の滲出が誘因となり、岩塊の崩落が発生したものと考えられた。この場合、崩落に影響を及ぼした顕著なすべり面が存在しているにもかかわらず、掘削時点に実施していた切羽観察において把握されていなかったのは、この不連続面が、切羽面にほぼ平行な走向を呈する地質構造であった為であった(図6)。

#### 3.3 施工段階での地質構造の把握

崩落原因を確認するため、下半掘削の施工段階において、崩落地点付近を含む約150m区間の側壁部の地質観察を実施した。地質観察の結果、黒色の粘板岩と砂岩優勢の粘板岩互層から構成され、大局的にはトンネル軸に若干斜交し流れ盤となるN65°E55°Nの走向傾斜を呈して分布していた。しかし、細かく見ると泥質岩は著しくせん断されており、砂岩もレンズ状やサイコロ状になっている部分もあり、複雑な地質構造であることが判明した(図7)。崩落が発生した区間は、薄いせん断した泥岩層を挟んだ厚い砂岩層が分布していることが確認できた。

#### 3.4 付加体での地質構造と工学的問題

図8は、側壁観察記録を基に地質構造をモデル化して三次元表現したものである。今回のトンネル掘削方向は、切

羽面とほぼ同じ走向傾斜を呈する層理面が存在していたため、切羽面の観察だけでは十分に地質構造が把握できなかった例である。なお、これらの調査の結果、図8に示したダム軸付近に位置する断層F-②を含むせん断帯が明らかになった。調査横坑でも把握できなかったダム軸付近を通る破砕帯の存在を、ダム本体工事の前に確認できたため、設計変更によりダム軸をずらすことでダムの安定性を確保するとともに、難工事となることを回避することができた。

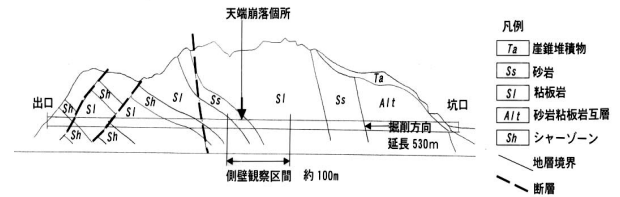


図5 対象トンネル設計段階の地質縦断図

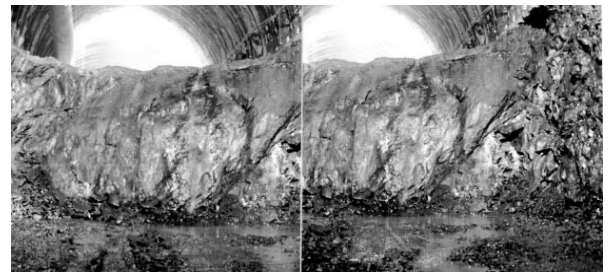


図6 切羽のステレオ写真



図7 側壁観察に観察された砂岩層の破砕構造

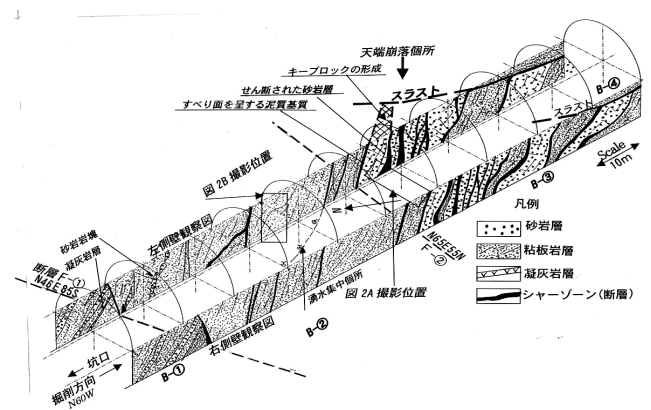


図8 側壁観察に基づく付加体の地質構造モデル



## 4. 付加体における地質検討事例

2009年、付加体の分布する地域で施工された焼坂第二トンネル工事のうち和田トンネル区間においては、掘削前に、既存の調査報告書と地表地質踏査により地質構造を予測検討し、地質工学的問題点を提示した。そして掘削完了後は、切羽観察を基に地質構造の見直しを行い、続いて掘削する焼坂第二トンネルにおける未掘削区間の地質状況について同様の検討を行なった。この一連の作業は、付加体における構造物施工時の入札時の技術提案から、設計、施工後までの地質関連業務の基本モデルとなるものであり、地質解析事例として以下にその詳細を述べる。

### 4.1 掘削前の地質解析

#### 4.1.1 既存地質報告書によるトンネル周辺の地質概要

この付近の地質は、四万十帯と呼ばれる白亜紀～古第三紀の堆積岩類が分布している(図9)。成り立ちが図3に示すように、プレートテクトニスの立場から、沈み込み帯における付加作用による堆積物であるために、主に砂岩泥岩互層を主体とする岩相を示しているが、付加体に特徴付けられる複雑な地質構造からなる。すなわち、巨大な硬い砂岩層のブロックを含む黒色の脆弱な泥質基質などを混在した荒々しい岩相と多数の走向断層や褶曲がみられ、激しく破碎・変形をうけた構造を示すのが一般的である。

#### 4.1.2 空中写真判読による不連続面の分布

図10に示した空中写真の地形判読により、和田・焼坂第二トンネルルートに関与するリニアメントは、図11に示したように大きなもので6本(破線)認められ、和田トンネルに交差するのはリニアメント①である。リニアメント①の方向がNS方向で、地層の走向(N60°E)とは異なり、かつ直線的であることから、N-S系の走向を持つ断層帯を反映した断層などの不連続面の分布が想定された。

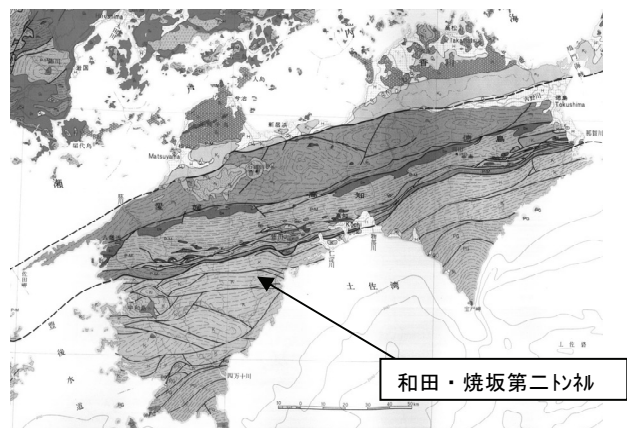


図9 検討施工現場周辺の地質図<sup>4)</sup>  
(四国地方土木地質図, 1998より引用。凡例は略す)

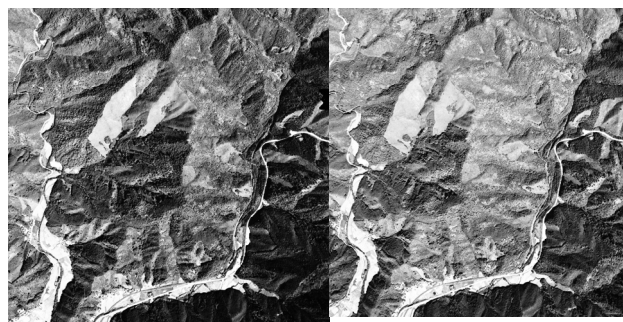


図10 地形判読に用いた空中写真(立体視用)

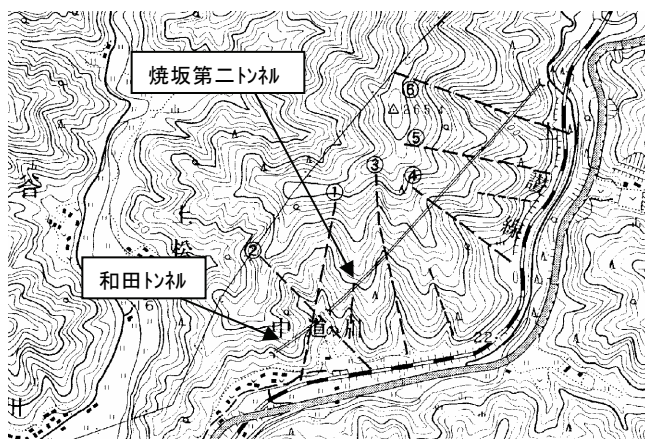


図11 空中写真判読により判読した不連続面の分布

#### 4.1.3 現地地質調査による地質情報

掘削前に、既存の調査報告書と地表地質踏査により地質構造を予測検討し、地質工学的問題点を提示した。概略的な地表踏査を行ったが、風化状態と草木の繁茂により露頭状態が悪く(図12)、充分なる地質情報が得られなかった。地表踏査の結果では大きな破碎帯を伴うような断層の兆候は見られなかった。

なお、掘削対象岩盤に分布する四万十層群は、プレート沈み込み帯の影響下で形成されたため、地層の連続性が悪く、急激な変化、消滅、他の岩相への漸移的な変化などに特徴付けられるため、地表からの情報で、地質構造を推定することは困難であることが多い。



硬質なレンズ状の砂岩ブロック、周辺の泥質岩は強風化

図12 露頭に分布する砂岩泥岩互層状態(立体視用)

#### 4.1.4 掘削前に想定された地質工学的問題点

以上の既存地質報告書、地形判読及び地表地質踏査に基づいて想定した地質構造(図13)より地質工学的問題点は以下のとおりであった。

①和田トンネルの西側坑口部(図13中のA切羽)と、東側坑口部(図13中のC切羽)の地質構造は、ほぼ東西の走向で同様であり、地層の大局的な走向(N60°E)がトンネル軸にほぼ平行(N50°E)しているので、坑口部の法面の切土によって観察された高角度で傾斜した頁岩優勢の頁岩砂岩のリズミカルな互層が、切羽でもほぼ変化なく続くものと想定される。

②頁岩層の中には薄い白色の酸性凝灰岩の薄層を数枚挟んでいる。切羽でこの凝灰岩層が乱れもなく連続していれば、岩盤は安定している。しかし、連続性がとぎれたり、形状に異常があれば、断層などの地質構造が考えられ、凝灰岩にそのような状態が観察されれば、周辺の岩盤状態に注意が必要である。

③硬い岩質ながら、節理が非常に発達していて、サイコロ状に割れやすい岩盤が続くものと想定される。

④湧水に関しては、地質構造から判断すると、山体からの地下水は、粘土化した凝灰岩層で遮断されて、地表からの雨水による滴水程度で少ないものと考えられる(図13中の②)。そのため、切羽では、地下水の影響が少なくなり未風化となり灰黒色を呈するようになる。

⑤地形判読や既存ボーリング結果から岩盤状態を考慮すると、東側坑口部付近では、N-S系の走向を持つ断層破碎帯がSTA.65+07付近に想定される。あるいは、著しく破碎を受けて細粉化し、土被りが小さく、湧水の影響で強風化している箇所も多いので、この付近にN-S系の断裂帯の存在も考えられる(図13中の③区間)。

したがって、STA.65+10付近から東側坑口までの約40m区間は、土被りが小さく、岩盤に多数の亀裂が発達するため、岩盤が脆弱化して、天端からの肌落ちや崩落、小規模の崩壊が懸念される。特に、岩質境界や亀裂面からの湧水に注意が必要である。

⑥トンネル全区間にわたって懸念される点は、頁岩層の中に介在する非常に硬い砂岩のレンズ状の岩塊が天端附近に分布していた場合、時間の経過とともに、ブロックとして崩落する危険があることである。湧水があれば、砂岩ブロックの表面に黒色泥質基質の鏡肌がすべり面となり、さらに危険が増大するものと想定される(図13中のB切羽)。

#### 4.2 掘削中・掘削後の地質解析

図14は、掘削完了後に切羽観察記録に記された地質構造を抜粋して表現したもの(約10m間隔にて)である。図15

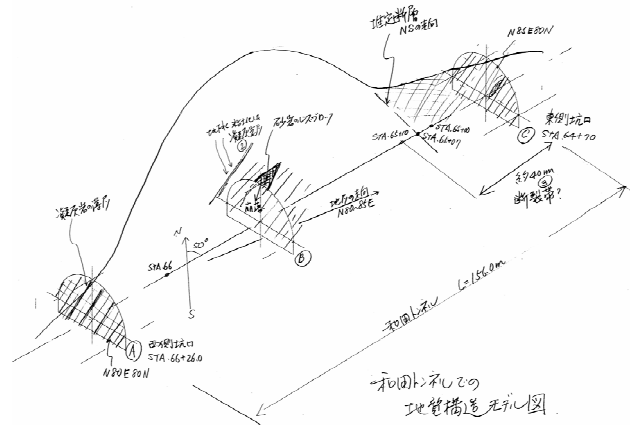


図13 掘削前に想定した和田トンネルの地質構造

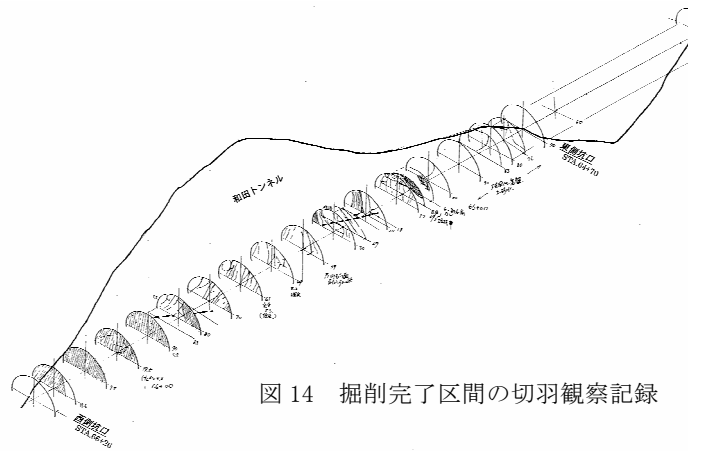


図14 掘削完了区間の切羽観察記録

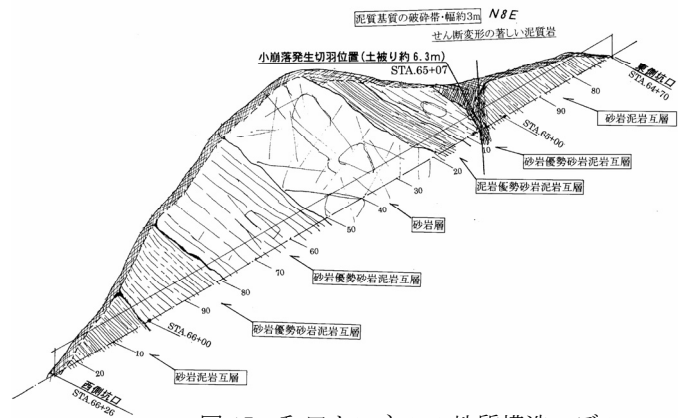


図15 和田トンネルの地質構造モデル

は、これらを基に想定した地質縦断図である。図14に示した観察結果の地質解析によって得られた見解は以下のとおりである。

①随所に付加体特有の地質構造が確認でき、砂岩層は、大小さまざまなブロックまたはスラブ状を呈しており、硬い砂岩のブロックやスラブに挟まれた泥質基質(泥岩)部分が、著しく破碎され千枚岩状となり、粘土混じり礫の土砂状となっている。

②地層の大局的な走向は、N80°~85°Eである。この方向は、掘削前に行なった地表地質踏査において、両坑口部

で測定された走向と同様(図 13)であり、トンネル軸 (N 50° E) と約 30° で斜交している。傾斜は、高角度で北方向が卓越している。

③砂岩優勢層のブロックの分布する区間では、砂岩が硬質のため侵食作用に強く、尾根を形成している箇所と一致しており、地形に岩相の違いがよく反映されている。

④STA. 65+09～STA. 65+06 の切羽で発生した小崩落の原因については、この付近に、N-S 系の走向を持ち、ほぼ垂直の断層破砕帯あるいは脆弱層の存在が想定される。この脆弱層については、図 13 に示したように、掘削前に STA. 65+07 付近に想定した推定断層と一致する。これは、地形判読によるリニアメント①(図 10)により想定したものである。この位置では、土被りが約 6m 前後と非常に小さく、泥質基質(泥岩)部分が著しく破砕を受けて細粉化し、湧水の影響で強風化して部分的に土砂化していたのが原因である。

⑤小崩落した切羽から採取した岩塊の鉱物学的試験により、地質工学的に判断した結果は以下のとおりである。

・岩塊の肉眼観察—崩落箇所のサンプリングした岩塊は、黒色を呈した泥質岩で、著しくせん断破壊され亀裂が発達して、手で圧力を加えると砕けてしまう程度の脆弱な状態になっている。図 16 は、その岩塊の表面の拡大画像である。断層鏡肌のような光沢を呈した著しい鱗片状劈開が見られ、潜在的に発達した劈開面によって、層状に割れやすくなっている。すなわち、著しい大きなせん断変形を被り、変形して破砕した泥質岩である。

・岩塊の鉱物学的試験—図 17 の回折図は、粘土のみを抽出して泥質部分の鉱物分析を行ったものである。葉片状鉱物の雲母が多量に含まれており、雲母鉱物が一定方向に並ぶと、平滑な面＝鱗片状劈開面が形成され、これがすべり面の役目を果たすことになる。

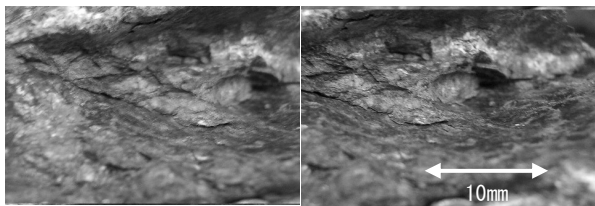


図 16 岩塊の表面の拡大画像(立体視用)  
著しい鱗片状劈開を有する泥質岩

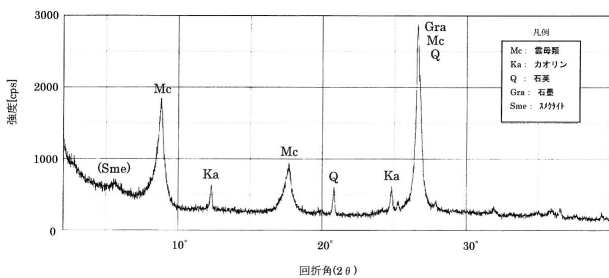


図 17 黒色泥質岩の X 線回折図

⑥地質構造と小崩落の関係は、以上のように、著しく鱗片状劈開の発達した破砕され脆弱な泥質岩の下位に位置する、トンネル軸方向に流れ目となっていた顕著な不連続面に沿って地下水が存在し、掘削によって泥質岩の下端が開放され、雲母を含む鱗片状劈開面と不連続面の境界がすべり面となり、小崩落が発生したものと想定される。

⑦図 15 の地質縦断図は、切羽観察記録を参考に、フラクタルを応用して(図 18)、地質構造をモデル化して作成した。

## 5. まとめ・今後の課題

以上のように、付加体岩盤におけるトンネル施工においては、付加体堆積物が造構作用を受けて形成されたもので、非常に複雑な地質構造を呈しており、掘削において予想される地質工学的問題点は、次のようにまとめられる。

- ・大小さまざまなサイズの硬い砂岩のブロックが存在するため、天端からの肌落ちや崩落、小規模の崩壊が懸念される。
- ・泥質岩優勢の岩盤では、脆弱化していることから、切羽、天端の崩壊、抜け落ちの可能性が懸念される。
- ・湧水が砂岩ブロックの表面に付けばすべり面となり、砂岩ブロックの崩落が懸念される。

また、付加体での施工中における調査方法としては、切羽から水抜きを兼ねた先行ボーリング(ノンコアでスライムで判定)が最適であり、地質解析には、図 18 に示したように、フラクタル的な概念の応用が有効である。

今後は、他の地質体についても、過去の事例を再整理・解析し、最適な地質予測手法を提案構築する予定である。

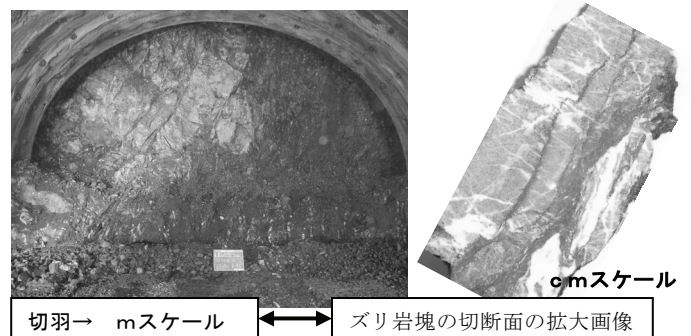


図 18 付加体地質構造で見られるフラクタル(自己相似性)

## 参考文献

- 1) 日本地質学会地質基準委員会編:地質基準, 共立出版, p. 58, 2001
- 2) 藤田崇編著:地すべりと地質学, 古今書院, p. 5, 2002
- 3) 日本地質学会:地質学論集第 55 号, p. 160, 2000
- 4) 四国地方土木地質図編纂委員会: 四国地方土木地質図, 1998