

加久藤トンネル（Ⅱ期線）における変位抑制工の設計と施工

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CONVERGENCE-CONFINEMENT APPROACH AT KAKUTO(PHASE Ⅱ) TUNNEL

三谷浩二¹⁾・山戸隆秀¹⁾・足立宏美²⁾・井上博之³⁾

Koji MITANI, Takahide YAMATO, Hiromi ADACHI and Hiroyuki INOUE

Kakuto(Phase Ⅱ) tunnel is a 6.25km tunnel on the Kyushu Expressways. The Phase Ⅱ tunnel is being excavated parallel to the close Phase Ⅰ tunnel which is now in service. The specific ground control problem occurred in the Phase Ⅰ tunnel construction was excessive convergence due to the plastic behavior of the weak tuff breccia. In order to avoid excessive convergence, which may cause serious damage to the Phase Ⅰ tunnel, a convergence-confinement approach is being employed in the construction of the Phase Ⅱ tunnel. As a result of the approach, the rate of convergence was significantly lower than would be otherwise expected.

Key Words: tunnel, neighboring construction, convergence-confinement

1. はじめに

高速道路網の充実に伴い、交通量拡大を目的として既設Ⅰ期線トンネルに平行して、新設のトンネルを建設する事例が多くなっている。このような工事では、Ⅰ期線トンネルに及ぼす影響を最小限にするとともに、長大トンネル得るでは併設されている避難坑の機能も保持しながらの施工が求められている。

Ⅰ期線トンネル施工時の記録があるため、地山が堅固な状態ではこの種の工事は特に問題なく急速施工が可能である。しかしながら、地山が軟質な場合には、新線掘削が供用トンネルや避難坑の安定に悪影響を及ぼすことがあるため、工事においては、設計の段階からかなり注意して行う必要がある。加久藤トンネル南工区では、Ⅰ期線トンネル施工時に400mmに達する大変位を生じた非常に軟質な地山を、各種の変位抑制工を採用して変形を許容値以下に抑えて施工した。今回は、採用した変位抑制工の設計と施工結果について報告する。

2. トンネル概要

加久藤トンネル（Ⅱ期線）は、九州縦貫自動車道入吉IC～えびのICの熊本県と宮崎県の県境に位置する延長6,251mの2車線断面長大トンネルである。そのうち、南工区はえびの側の約2,848mをえびの側から施工するものである。

この南工区では、Ⅰ期線トンネルの建設時に本坑および避難坑で大量出水と大変位を生じ、さらに増大する変位により先行施工した避難坑へも影響が及んだと報告されている。そのためⅡ期線施工では、Ⅰ期線への影響を極力回避し、かつ避難坑の避難通路機能を活かすために、図-1に示すトンネル平面図のように、それらの区間ではⅠ期線との離隔距離（トンネル中心距離）を60mとした線形としている。

1) 正会員 日本道路公団 八代工事事務所

2) 前田・東急・さとうベネック共同企業体加久藤トンネル南作業所

3) 正会員 前田建設工業(株) 技術研究所

3. 地質・地形概要

加久藤トンネルは、熊本、宮崎県境を東西に連なる標高約 700m の山地を標高約 330m でほぼ南北に貫いており、そのため土被り高さは最大約 400m に達している。南工区周辺の地形は、新生代第四紀の肥薩火山岩類の安山岩溶岩で構成される溶岩台地地形で、山地地形の南側からえびの側坑口へ至る広い範囲に見られる、溶岩に特有な大地状の平坦面を持つ地形である。ここは、肥薩火山岩類のうち安山岩を主体とし、一部に凝灰角礫岩が挟在する地質で構成されている。

地表面に分布する肥薩火山岩類の下部に、新生代新第三紀鮮新世えびの層群があり、南工区はこの地層を掘削するものである。えびの層群は安山岩と凝灰角礫岩からなり、南西方向に傾斜しているため、トンネル切羽には流れ盤となって交互に出現する。この安山岩は、固結程度は良いものの亀裂が発達し透水係数は大きく透水層となっている。凝灰角礫岩は熱水変質作用を受けているため、一軸圧縮強度で 6N/mm^2 程度と軟質であるが、不透水層となっている。地質縦断面図を図-2 に示す。

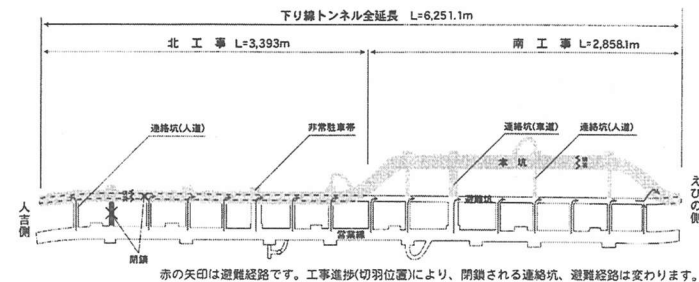


図-1 加久藤トンネル平面図

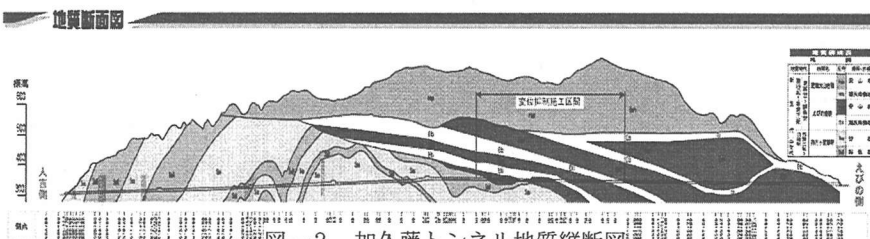


図-2 加久藤トンネル地質縦断面図

4. 大変位区間での変位抑制工の設計と施工

I 期線施工時において、変形余裕量（最大 25cm）で対応していた大変位区間の施工に当たり、供用中の I 期線に悪影響を与えないような施工法や支保パターンを決める必要があった。II 期線掘削中の変形が I 期線と同じ程度に大きくなると、応力変化が I 期線周辺にまでおよび覆工にさらに変位を引き起こす可能性があり、この時の通行車両（15,000 台/日）に影響を与えた場合のリスクが大きいのである。

そこで、施工に必要な管理基準値の設定や変位抑制のための施工方法や採用する支保工などの事前検討は、過去事例や数値解析を駆使して、かなり詳細にかつ念入りに行った。

4. 1 管理基準値

変位抑制の管理基準値は、I 期線トンネルの覆工コンクリートに剥落を生じさせないという条件で定めた。I 期線トンネルの覆工コンクリートに剥落を生じさせないために、II 期線トンネルの変位をどの程度まで抑えればよいか限界値を決めることは工学的に非常に難しい問題である。

そこで、他の類似トンネルの事例および 2 次元 FEM 解析による覆工コンクリートに作用する引張応力の増加予測の両面で検討し、これを学識経験者で構成される委員会に諮問して最終的に決定した。

I 期線を管理対象にするのは良いが、供用中であり頻繁には測定できない、しかし II 期線変位だけ監視していたのでは、先行変位などの問題があり手遅れになる可能性があった。そこで、中間にある避難坑を監視し、I 期線の安全を確保することにした。そのためには、避難坑での管理基準値を設定することが不可欠となった。

他工事の事例調査では、全国の近接トンネル工事の収集と道路公団内で施工中の II 期線工事例の収集を行い、調査した中で最も悪い D 地山では、新設トンネルの変位の管理基準値レベルⅢは 100mm 程度に設定されている

ことを把握した。

当工事では、Ⅰ期線および避難坑施工時の施工データ、計測データが残されていたため、これらのデータを用い、数値解析を行って、Ⅱ期線掘削時のⅠ期線の挙動を把握し、避難坑、Ⅱ期線の管理基準値の設定に利用することにした。数値解析を利用した管理基準値設定の流れを図-3に示す。また、FEM解析の最終の変位結果を図-4に示す。

管理基準値の設定は、Ⅰ期線覆工コンクリートの許容引張り応力を 1.8N/mm^2 とし、図-5の解析結果に適用して避難坑、Ⅱ期線の目安となる許容変位を決定した。

この結果と前述の過去事例の分析結果を鑑みて、表-1に示す管理基準値を設定した。表-1におけるⅡ期線トンネルの管理基準値は掘削後に計測できる先行変位を除いた値である。

4. 2 変位抑制工の設計

変位抑制工は、当然のことながら発生する変位を管理値以下にすることが求められ、その上で施工性、工費を勘案して選定される。今回の場合のように供用線トンネルを対象にした抑制工の場合には、施工中に変位が増え始めてから採用したのでは手遅れになるので、事前にどの程度の変位抑制効果があるかを設計し、準備しておくことがより重要である。そこで、下記に示す方法で抑制効果を事前に想定し、効果を確認して施工した。

1) 抑制効果の評価

FEM解析で掘削開放応力を20分割して逐次開放させ、その掘削開放応力と内空変位の関係性を求め、特性曲線を作成した。次に支保構造の抑制効果を定量的に表すために、掘削・支保を模擬して、支保パターン毎の剛性を入れてFEM解析を実施し、同様の特性曲線を作成した。これらの特性曲線から各支保パターンの変位抑制効果を検討することにした。

この考え方の妥当性を検証するために、北工区で地山状況が断層破碎帯よりもかなり悪いと考えられた区間を対象にして支保パターンを検討し、その効果を上記の特性曲線から算定して、実測結果と対比した。その結果、採用した支保パターンで発生変位をこの区間の管理基準値以内に収めることが出来ており、FEM解析

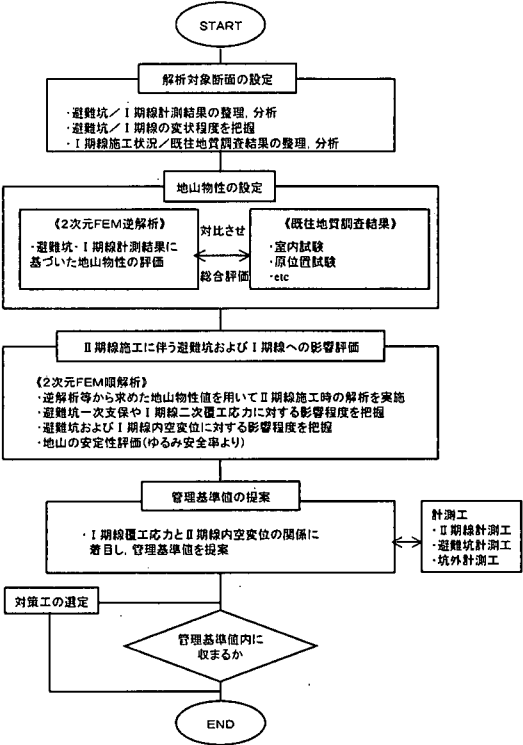


図-3 数値解析を利用した管理基準値設定の流れ

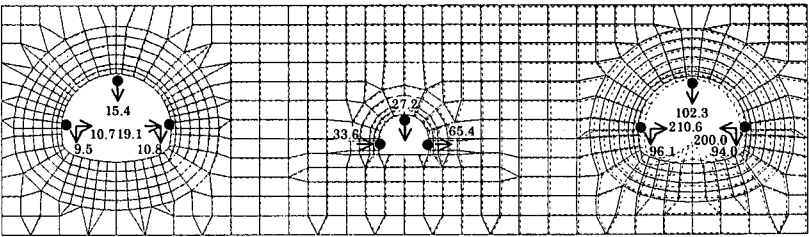


図-4 FEM解析での最終変位結果

注意 LEBEL	避難坑		Ⅱ期線		管理レベルへの対応
	天端沈下	水平内空変位	天端沈下	水平内空変位	
LEBEL I	- 6.0mm	6.0mm	-25.0mm	- 50.0mm	日常管理(通常施工)
LEBEL II	-12.0mm	12.0mm	-50.0mm	-100.0mm	注 意(状況によっては、増しボルトや増し吹き等を施工) …計測強化…
LEBEL III	-20.0mm	20.0mm	-85.0mm	-175.0mm	警 戒(早期閉合にて積極的に変形抑制を図る) …計測強化… 施工中止(別途協議)

※ LEBELⅢは、事例調査や解析結果を鑑みて設定し、LEBELⅢの約 60%を LEBELⅡ、約 30%を LEBELⅠとした。
※ - : 沈下、縮小 + : 隆起、拡大

で考慮できない鋼管膨張型ボルトなどの効果を考えると、特性曲線を用いた抑制効果の検討方法は妥当であると判断できた。

2) 変位抑制工のパターン

南工区の変位抑制工として、抑制効果を段階的に下げた3パターンを設定した。現況の施工機械と掘削工法（補助ベンチ付全断面掘削）で施工できる最大剛性の支保パターンをDV2（図-6参照）とし、これより長尺鏡ボルトを抜き吹付けコンクリートの強度を標準（ $\sigma_{28}=18\text{N/mm}^2$ ）としたDV1、さらに吹付けインパートの閉合を抜いたDV1の3パターンである。図-7には、DV1、2パターンの早期閉合の施工縦断面図を示す。図-8に、前述のFEMによる特性曲線で事前に検討した各パターンの変位抑制効果を示す。DV1パターンでは管理基準値を満足することが出来る、吹付けインパートを施工するDV1パターンではほぼ管理基準値を満足し、最大剛性のDV2パターンでは十分に管理基準値を満足することがわかる。

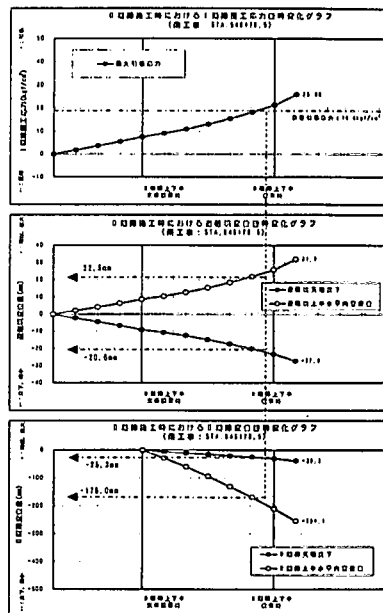


図-5 解析結果から求めた許容変位

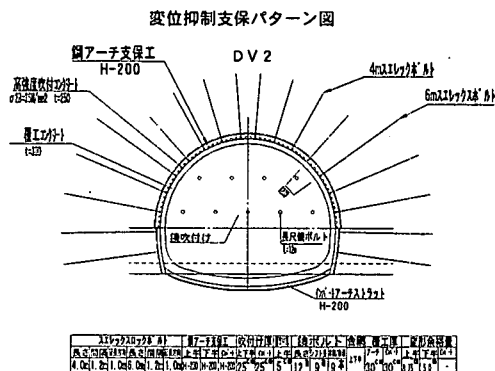


図-6 DV2パターン図（変位抑制工の例）

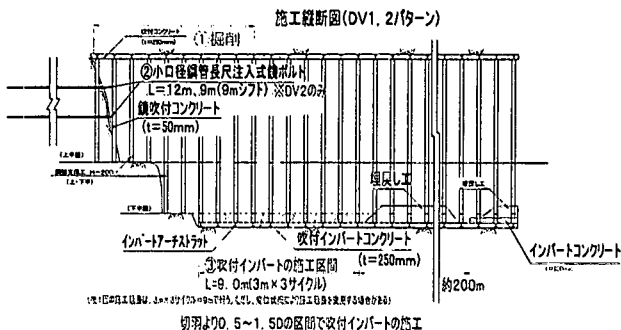


図-7 早期閉合縦断面図（DV1, 2パターン）

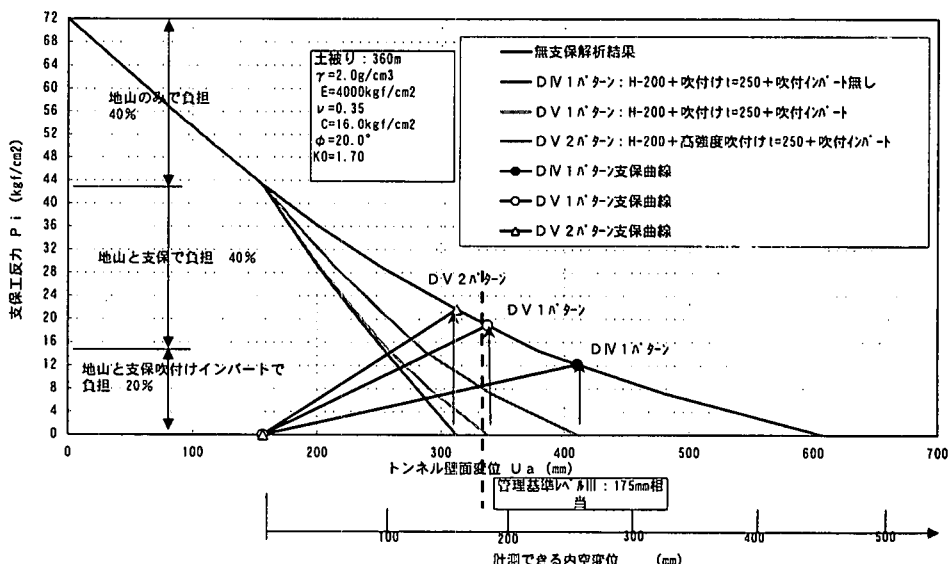


図-8 FEMによる特性曲線で事前に検討した各パターンの変位抑制効果

1) 早期断面閉合を実施したDV1,2 パターンの上半内空変位は、早期閉合を行っていないDV1 パターンに比べ 60mm～100mm 程度小さい。これは、早期閉合の効果と考えられる。

2) 同じ早期閉合を実施したDV1 とDV2 を比べると、DV2 で生じた変位の方が小さいことがわかる。これは、DV2 で採用した高強度吹付けコンクリートおよび長尺鏡ボルトの効果と考えられる。

3) 図-10 において、○印をつけた断面閉合時期前後の内空変位の変位速度は明らかに異なり、閉合後は変位速度が鈍化し収束傾向を示している。変位抑制には断面閉合が有効で、その施工時期が早いほど効果が顕著になることが今回の結果からも得られている。

図-11 にはDV2パターン実施区間で得られた内空変位の経時変化図を示す。各地点の経時変化図を見ると、断面閉合時期が上半切羽との離れ 10m 以内と以上の2つに、グルーピングされると考えられる。すなわち、上半切羽との離れが 10m 以内(具体的には 8.0～9.2m)では、若干のばらつきはあるものの、60mm 前後で収束しているのに対し、10m 以上離れる(具体的には 11.2～14.2m)と 80mm 前後の値での収束となり、両者で 20mm 程度の差が見られる。これは、数 m といえども早く閉合したためと考えられ、断面の早期閉合の有効性を表したものと考えられる。

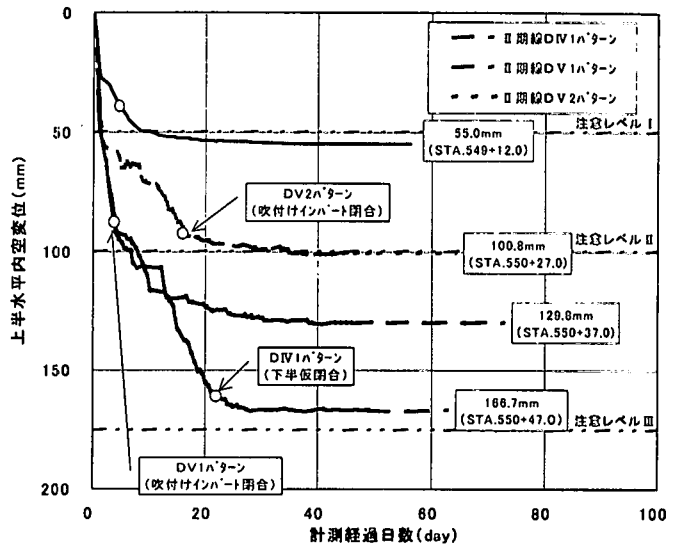


図-10 各抑制工パターンでの内空変位発生状況図

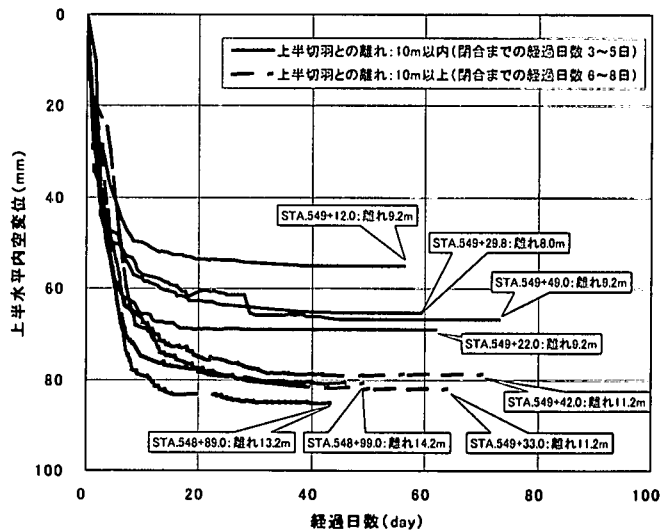


図-11 DV2パターンでの内空変位発生状況図
(インバート閉合時期の違いによる内空変位の差の状況)

6. おわりに

I 期線建設時に大きな変位を生じた地山を掘削するII期線工事で、そのI期線に影響を与えないように、変位抑制工を事前に検討し適用した。抑制工を適用した区間では、最も大きい変位でもあらかじめ設定した許容変位値の注意レベルIII以下に抑えることが出来、大部分は注意レベルII付近の値であった。I期線とII期線の中間にある避難坑では、路盤コンクリートのひび割れや浮き上がりなど被害が生じたが直ちに補修したため、避難坑機能を阻害することはなかった。そして、I期線には全く被害を生じさせることはなかった。このように、抑制工の効果は十分なものが得られた。しかしながら、経済性の観点からは当然のことながら高価となり、変位抑制効果がコスト増に見合うものかについてはまだ改善の余地があると考えられる。

南工区は、今後も変形が大きい区間が予想されるので、長尺鏡ボルトの充填材の改良、通常ロックボルトの採用を考慮した新たな抑制支保パターンを考案し、地山や変位状況により採用していくことで経済性にも配慮した施工を進めていきたいと考える。