

山岳トンネルにおける変形抑制目的の 支保パターンの決定方法

早川 泰央¹・平野 宏幸²・濱洲 良介³

¹ 正会員 清水建設株式会社 九州支店 土木部（〒810-8607 福岡県福岡市中央区渡辺通3丁目6-11）
E-mail: y.hayakawa@shimz.co.jp

² 正会員 清水建設株式会社 九州支店 土木部（〒810-8607 福岡県福岡市中央区渡辺通3丁目6-11）
E-mail: hirano@shimz.co.jp

³ 正会員 清水建設株式会社 九州支店 土木部（〒810-8607 福岡県福岡市中央区渡辺通3丁目6-11）
E-mail: r.hamasu@shimz.co.jp

山岳トンネルの設計は，当初設計と修正設計に大別され，当初設計に対して適宜修正設計の必要性を判定しながら施工を進める．修正設計では，施工中に実施される切羽観察や計測等の結果に基づき，地山等級を適宜見直して支保パターンや補助工法を変更していく．切羽観察による切羽評価については，各発注機関から観察結果を点数化し評価する手法が示されているが，坑内変位計測の評価手法については確立された方法はなく，現場条件に応じて個別に対応しているのが現状である．

本報告は，坑内変位計測の評価方法として坑内変位計測から地山強度比を推定し，地山強度比に対応する地山等級から変形抑制目的の DIIおよび E パターンを決定する方法を採用した事例を報告するものである．

Key Words : ground classification, displacement, competence factor, FEM analysis

1. はじめに

山岳トンネルの設計は，当初設計と修正設計に大別され，当初設計に対して適宜修正設計の必要性を判定しながら施工を進める．修正設計では，施工中に実施される切羽観察や計測等の結果に基づき，地山等級を適宜見直して支保パターンや補助工法等を変更していく．道路トンネルでは，B，CI，CII，DIの支保パターンについては切羽観察による切羽評価を主として決定され，DII，Eの変形抑制を目的とした支保パターンについては坑内変位計測によるトンネル安定評価を主として決定することが多い．切羽観察による切羽評価については各発注機関から観察結果を点数化し評価する手法が示されており，切羽観察の定量的評価手法として標準的に広く用いられている．一方，坑内変位計測の評価手法については確立された方法はなく，現場条件に応じて a：過去の類似事例の実績に基づく方法，b：数値解析による方法，c：限界ひずみ法等により個別に対応しているのが現状である．

本報告は，熊本 57 号滝室坂トンネル西新設（一期）工事において，坑内変位計測の評価方法として変位計測から地山強度比を推定し，地山強度比に対応する地山等

級から支保パターンを決定する方法を提案し，実施した事例を報告するものである．

2. 工事概要

(1) 工事内容

滝室坂トンネルは，熊本市と大分市を結ぶ中九州自動車道の一部で，阿蘇外輪山の東部を貫く全長約 4.8 km，掘削断面積 107m²（仕上り断面積 95m²）の道路トンネルである（図-1）．当工事は，このうち西側（阿蘇外輪山の内側）の本坑 2,679m，避難坑 3,069mを施工する．

工事名称：熊本 57 号滝室坂トンネル西（一期）工事
発注者：国土交通省 九州地方整備局
工事区間：阿蘇市一の宮町北坂梨～一の宮町坂梨
工期：平成 30 年 4 月 2 日から令和 3 年 3 月 31 日

(2) 地質概要

トンネルには，更新世の先阿蘇火山岩類（PA）の上に阿蘇 1～4 の火砕流堆積物（Aso-1～4）とその間に挟在

する間隙堆積物（Aso-2/1：凝灰岩・砂岩、Aso-4/3：降下堆積物）がほぼ水平に分布している（図-2）。

本工事の地質は、PA と Aso-1 が主体で、PA は風化が著しい凝灰角礫岩と凝灰岩が想定されている。特に上層の Aso-1 との境界部は、基質が粘土で脆弱部と評価され、事前調査では一軸圧縮強度が0.1～1.9N/mmと小さく、地山強度比が1を切ることが指摘されていた。

(3) 脆弱部の課題

脆弱部では地山強度比が1を切ることから、当初設計において標準支保パターンではなく、解析的手法を用いて支保構造、補助工法を決定している。当初設計で行った3次元FEM解析では、避難坑で50mm以上、本坑で100mm以上の変位が予測され、インバートストラットによる早期閉合と高規格支保工および高強度吹付けコンクリートを採用したEパターンで対応することとなっていた。したがって、実施工においては地山状況を見極めてEパターン採用の判断を迫られる。

第1章で述べた通り、DIIやEパターンのように大変形に対応する支保パターンは、坑内変位計測からトンネル安定を評価することが多い。坑内変位計測の評価手法については、現地で簡便に坑内変位の管理基準に適用できる限界ひずみ法¹⁾が多く現場で採用されている。こ

の方法は、坑内変位から算定した地山のひずみを現位置試験や室内試験から得られた破壊ひずみと比較評価し、現状の支保パターンが適切かどうかを判断するものである。このため、地山状況から定量的に地山等級を判定し、地山状況に応じて支保パターンを決定することができない。また、地山の一軸圧縮強度や変形係数が小さいほど限界ひずみが大きくなり許容される坑内変位量が大きくなるため、特に大変形地山において掘削内空断面や支保工の健全性が確保できない場合があるといった問題もある。

よって、本工事では脆弱部においてEパターンを適切に判定することが技術的課題であった。

3. 提案する支保パターン決定方法

第2章で述べた通り、本工事の脆弱部において適切な支保パターンを判定する必要があった。そこで、筆者らは、DIIおよびEパターンを変形抑制目的の支保パターンであると位置づけ、変形量に応じてこれらの支保パターンを適切に決定できる方法を検討した。そして、トンネル設計で地山等級の目安となっている地山強度比に着目し、変位計測から地山強度比を算出して定量的に支保パターンを決定する方法を提案した。なお、本工事では、DIIパターンが設定されていなかったため、早期閉合の異なる2つのDIIパターンを提案している。

(1) 地山等級と支保パターンの考え方

まず、支保パターンの考え方を整理する。既往の研究²³⁾⁴⁾により各地山等級におけるトンネル掘削時の地山挙動と支保工の役割、および、地山強度比をまとめると表-1の左側となる。表より、DIでは緩みが拡大して一部塑性変形が発生し、DII、Eになるとさらに塑性変形が大きくなり支保工が緩み荷重を直接支持する必要があるこ



図-1 現場位置図

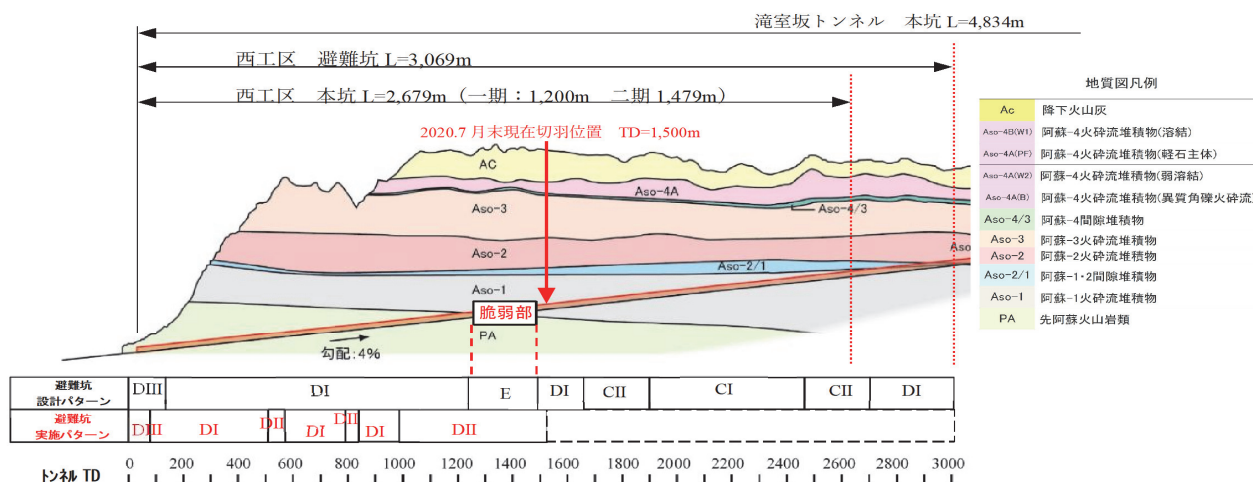


図-2 地質縦断面図

とがわかる。すなわち、DIまではグラウンドアーチの形成が期待でき早期閉合がなくても変位は収束するが、DII、Eでは早期閉合により積極的に変位を抑制して支保の内圧効果を活用する必要がある。そこで、DIIは標準パターンで変形余裕を確保して早期閉合により変位を抑制し、Eはさらに支保剛性の向上、および、構造上有利な断面形状（円形に近い形状）の変更により大きな緩み荷重に対応するという支保パターンの考え方を提案する（表-1の右側）。

支保パターンの決定は、B～CIIパターンについてはこれまで通り切羽観察による切羽評価、DI～Eパターンについては切羽評価に加えて既往の研究²⁴⁾にある地山等級に応じた地山強度比を基に決定することとで、適切な支保パターンを定量的に評価して決定する（表-1の赤枠）。参考に、本工事で採用した避難坑支保パターンを表-2に示す。

(2) 支保パターンの決定方法

本報告で提案する支保パターンの決定方法を図-3に示す。B～CIIパターンについては切羽評価点で決定され、切羽評価点 40 点以下の DI～E パターンについては地山強度比より決定する。地山強度比を算定するためには、

$$E = 105 \text{ qu} \quad (1)$$

(E：変形係数，qu：一軸圧縮強度)

表-1 地山等級と支保パターン

地山等級	地山の挙動と支保工の役割 ^{2) 3)}	地山強度比 ^{2) 4)}	支保パターンの考え方の提案	
B	・ゆるみはほとんどない ・内空変位：15 mm程度以下 ・微小な弾性変形 ・支保工は、地山の風化防止を主とする	—	○標準パターン	切羽評価より決定
C I	・ゆるみは部分的 ・内空変位：15～20 mm ・小さな弾性変形 ・支保工は、局所的な抜け落ち防止と風化防止	4 以上		
C II	・ゆるみは大きくなる ・内空変位：20 mm程度 ・概ね弾性変形 ・支保工は、ゆるみ荷重を支持してゆるみの拡大防止	4 以上		
D I	・ゆるみが拡大する ・内空変位：30～60 mm ・弾性変形と一部塑性変形 ・支保工による内圧効果、地山内の塑性領域発生を抑制	4～2	○標準パターン 早期閉合なし	切羽評価と変位計測より決定
D II	・ゆるみが拡大し変位が非常に大きい ・内空変位：60～200 mm ・弾性変形と大きな塑性変形 ・支保工は、ゆるみ荷重を直接支持 ・インバートによる早期閉合や変形余裕が必要	2～1	○標準パターン 変形余裕考慮 早期閉合（吹付けインバート、インバートストラット）	
E	・ゆるみが拡大し変位が非常に大きい ・内空変位：200 mm以上 ・大きな塑性変形 ・支保工は、ゆるみ荷重を直接支持	1 以下	○特殊パターン 支保剛性の向上 断面形状の変更 早期閉合（インバートストラット） ※数値的解析等により決定	

地山の一軸圧縮強度が必要となるが、現位置試験やボーリングコアの室内試験より得られた一軸圧縮強度では地山の局所的な値となり、地山全体を正確に評価できない問題がある。そこで、地山全体を均質体と考え、変位測定結果を逆解析（FEM 解析による同定解析）することにより巨視的に平均的な変形係数を推定して一軸圧縮強度を算定した。変形係数から一軸圧縮強度の算定は既往の研究⁹⁾より式(1)を使用した。これにより、地山強度比（Gn）を算定し、 $Gn \geq 2$ であればDIパターン、 $2 > Gn \geq 1$ であればDIIパターン、 $Gn < 1$ であればEパターンとなる。また、早期閉合の異なる2つのDIIパターンについては、初期変位速度から最終変位量を予測し、計測初期段階で $2 > Gn \geq 1$ となることが予測される場合はインバートストラットによる早期閉合（DII-is）、計測初期段階では変位が小さくその後変位が増大して $2 > Gn \geq 1$ となる場合は吹付けコンクリートによる早期閉合（DII-i）としている。なお、初期変位速度から最終変位量の関係は過去の実績⁹⁾の式(2)を使用し、避難坑については小断面で使えるように内空幅の比で補正した式(3)を使用した。

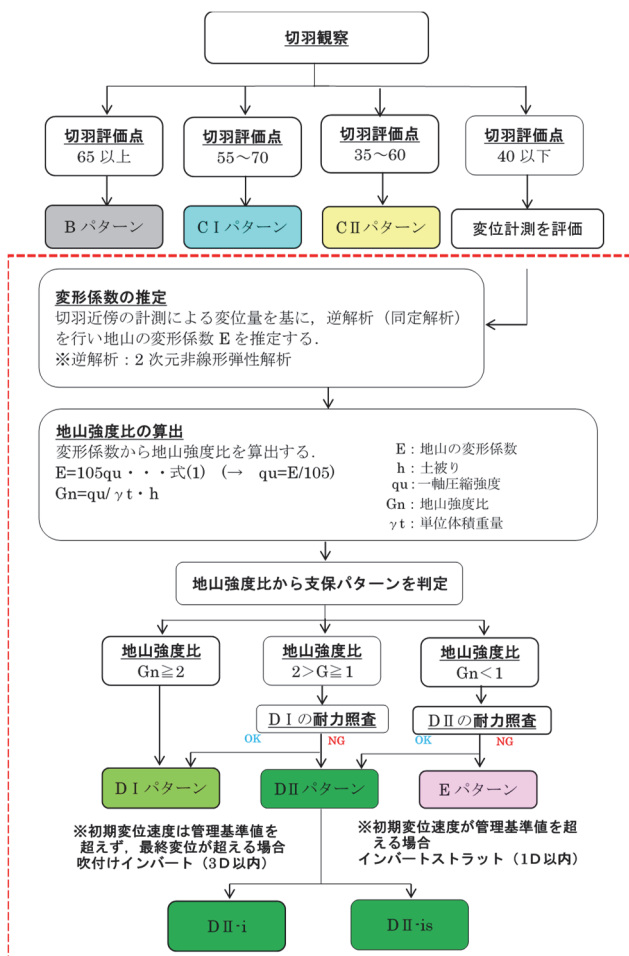


図-3 支保パターン決定フロー

表-2 避難坑の支保パターン

パターン名	D I	D II-i	D II-is	E
支保パターン図				
断面形状	幌型	馬蹄形	馬蹄形	円形
1 進行長	1m	1m	1m	1m
鋼製支保工	H-100	H-100	H-100	HH-131
吹付けコンクリート	t=100mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	t=100mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	t=400mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	t=400mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$
ロックボルト	L=2m, D25	L=2m, D25	L=2m, D25	L=2m, D25
変形余裕	なし	なし*)	なし*)	なし*)
早期閉合	なし	吹付けコン t=100mm	ストラット H-100 吹付けコン t=100mm	ストラット HH-131 吹付けコン t=400mm
閉合距離	—	1～3D	1D以内	1D以内
設計根拠	標準支保パターン	標準支保パターン + 早期閉合	標準支保パターン + 早期閉合	特殊支保パターン + 早期閉合**)

* 設計要領により小断面には変形余裕を設けない。本坑のD II, Eパターンは変形余裕 100mm あり。

** 当初設計で3次元FEM解析により決定。

本 坑： $\sigma_{\max}=8.2 \sigma_{v\max}$ (2)

避難坑： $\sigma_{\max}=3.1 \sigma_{v\max}$ (3)

($\sigma_{\max}$ ：最終変位量, $\sigma_{v\max}$ ：初期変位速度)

以上より、トンネル周辺地山の平均的な地山強度比を評価できるとともに、変形抑制目的のパターンであるDII, Eパターンを地山の変形特性により決定するため、合理的な支保パターン決定方法であると言える。すなわち、変位が小さい場合は標準パターンのDIとなり、変形が増大する場合のみ早期閉合が必要なDII, Eパターンとなる。

4. 施工結果

提案する支保パターン決定方法により実施した2020年7月末時点での避難坑の施工結果について述べる。

図-2に示す通り、PAの設計支保パターンがDIの区

間を概ね地山強度比が2以上であったためDIで施工した。一部、変位が増大した箇所は地山強度比が2を下回ったためDIIに変更した。大変形が予想された脆弱部は、予想よりも約290m手前のTD=943mで出現したが、地山強度比が1～2で推移したため設計支保パターンがEの区間もDIIで施工した。

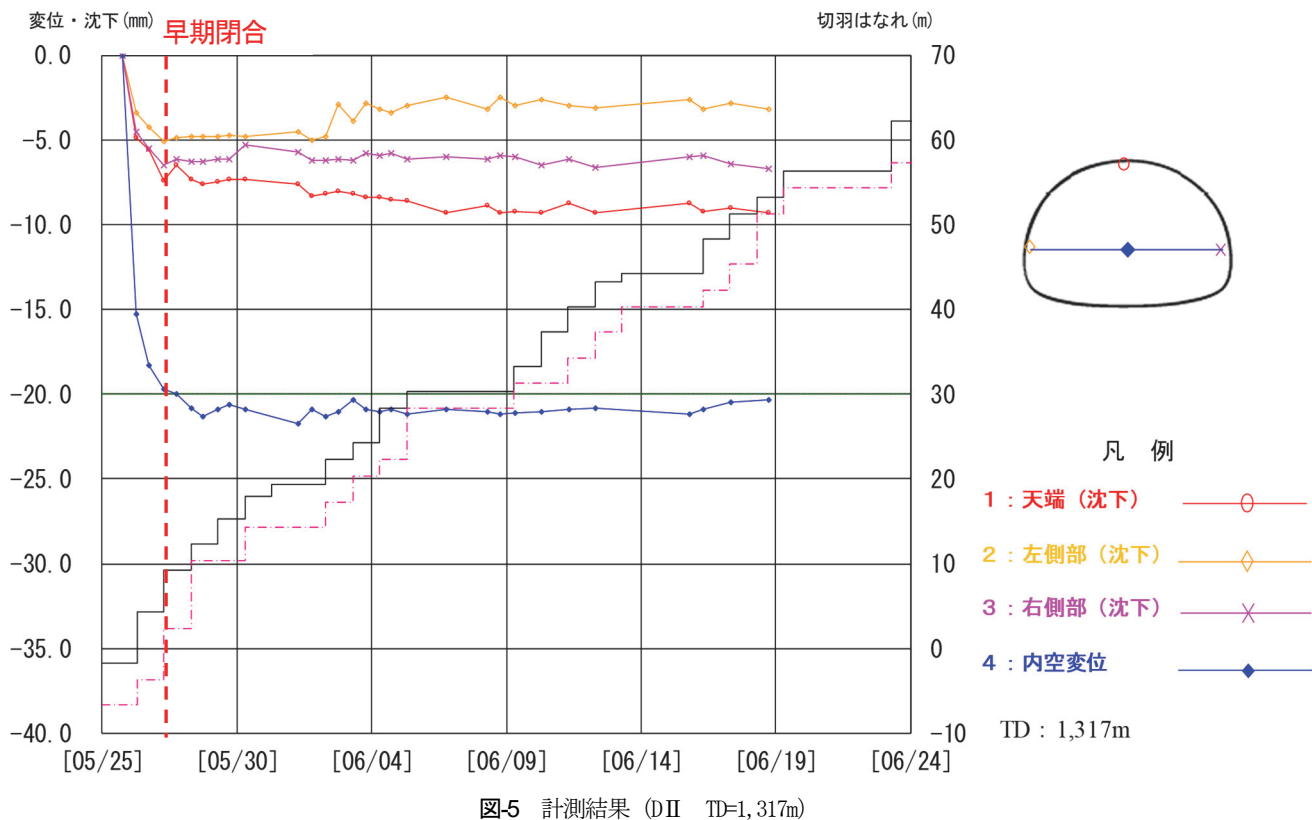
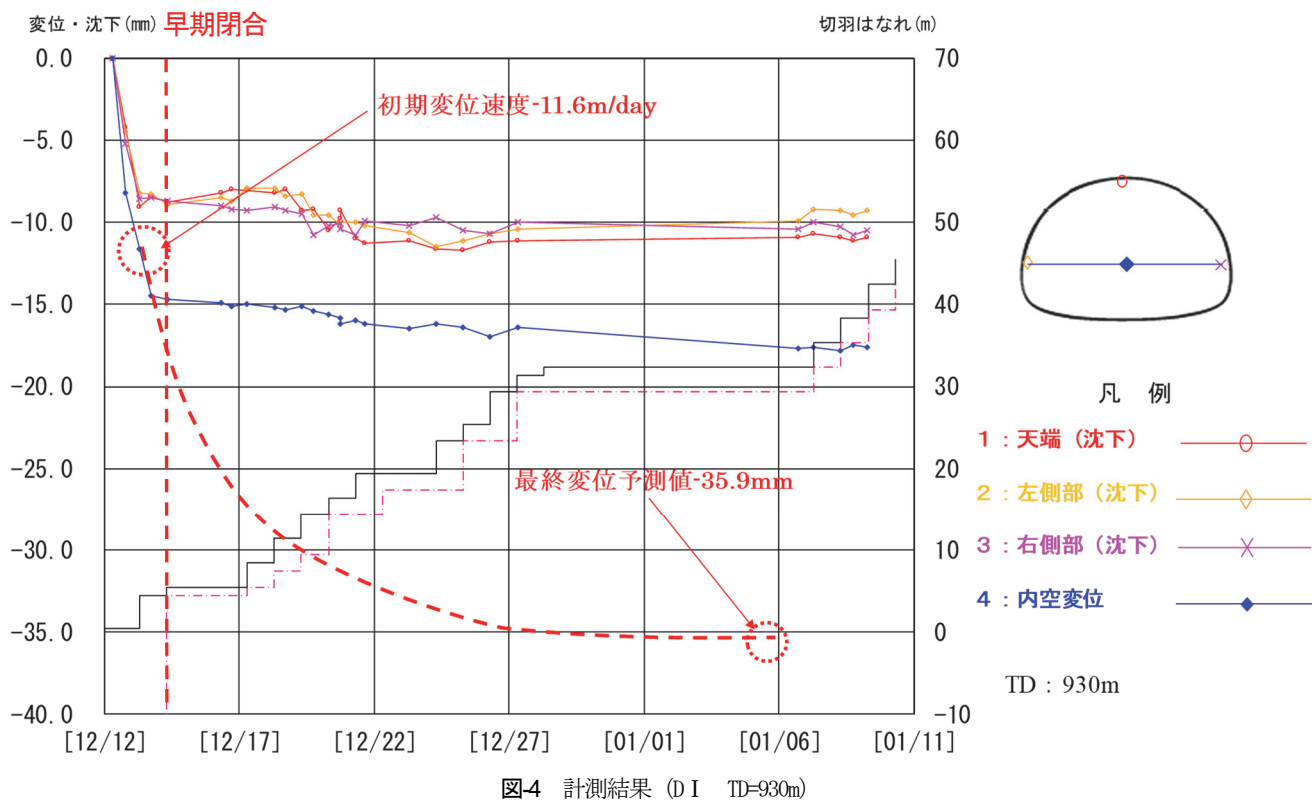
脆弱部において、図-3のフローに沿ってDIからDIIに変更した施工実績を詳細に述べる。TD=943mで切羽は凝灰角礫岩主体から未固結の凝灰岩主体となり変位計測は図-4に示すように内空変位の初期変位速度が11.6mm/日となった。変形モードは沈下より内空変位が卓越しており、土圧により側壁から押されていることが明白であった。この初期変位速度から最終変位量を予測すると35.9mmであり、この変位から逆解析で算定される地山強度比は1.1であったため支保パターンはDII-isとした。その後、インバートストラットによる早期閉合の効果で変位速度は大きく低下し、約18mmで収束傾向を示した。

4. 考察

坑内変位計測の評価手法として変位計測から地山強度比を推定して支保パターンを決定する方法を提案し、実現場に適用した。2020年7月末時点の避難坑の施工結果から得られる知見を以下に示す。

(1) 提案した支保パターン決定方法の妥当性

避難坑の施工において、提案した支保パターン決定方法により変位状況に迅速かつ適切にDIIパターンを決定できた。特に、当初設計で予想された脆弱部のEパターン区間においても地山強度比は1～2でありDIIパターンで施工でき、経済的な施工であった。同区間の変位計



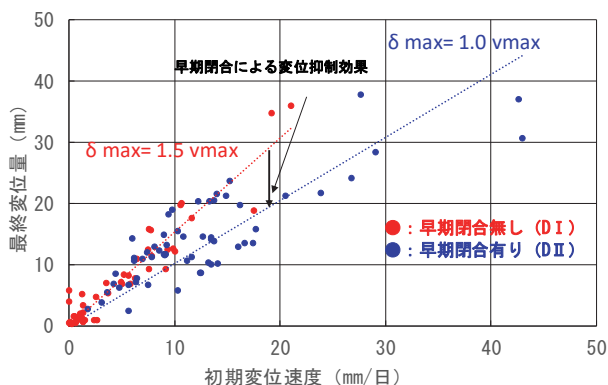


図-6 初期変位速度と最終変位の関係

測結果を図-5に示す。図より、大きな初期変位速度が発生しているものの早期閉合により大きく変位が抑制されていることがわかる。また、計測Bにおいても支保工応力は最大で降伏応力の $2/3$ 程度であった。これは、本堤案の考え方で述べた通り、地山強度比が $1 \sim 2$ であれば標準支保パターンの早期閉合で対応可能であることを示している。

(2) 早期閉合の効果

避難坑の変位計測結果から得られた初期変位速度と最終変位量の関係を図-6に示す。図の赤いプロットは早期閉合なしの DIパターンで、青いプロットは早期閉合有りの DIIパターンである。早期閉合有りと無しで近似直線の勾配が異なり、DIIパターンの方が同じ初期変位速度であっても最終変位は大きく抑制されていることがわかる。このように、初期変位速度が速い地山に対して早期閉合が有効に機能したことが確認できる。

5. まとめ

本報告で提案した支保パターン決定方法は、実現場において適用可能であることが確認された。ただし、現時点では避難坑のデータのみであるため、今後は本坑の施工データも分析する必要がある。また、地山強度比 1 以下の施工データがないため、さらに土圧が作用する地山に適用できるかの実証が必要である。

この支保パターン決定方法は、地山の变形特性から地山強度比を推定し支保パターンを決定するため、変形抑制目的の支保パターンを適切に決定できる。一方、地山強度比を変位量から逆解析で算定するため、計測のたびに解析を行う必要があり計測管理の労力を要する課題も残っている。今後は、地山ごとに地山強度比に応じた変位量を事前に算定して早見表を作成する等、現場で簡易に決定できるよう改善する必要がある。

参考文献

- 1) 桜井春輔：トンネル安定性評価のための限界ひずみ，土木学会論文集，No.496号，pp.185-188，1994.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書【共通編】・同解説/【山岳工法編】・同解説，pp.48-50，2016.
- 3) 日本道路公団：設計要領 第三集 トンネル，pp.66-77，1997.
- 4) 北海道開発局：令和2年度北海道開発局道路設計要領 第4集 トンネル，pp.4-2-27.
- 5) 桜井春輔：都市トンネルの実際 合理的な設計・施工法をめざして，pp.11-12，鹿島出版会，1998.
- 6) 日本道路公団：設計要領 第三集 トンネル，pp.84，1997.

(2020. 8. 7 受付)

METHOD TO DECIDE SUPPORT PATTERN TO CONTROL GROUND DISPLACEMENT IN MOUNTAIN TUNNEL

Yasuo HAYAKAWA, Hiroyuki HIRANO and Ryouzuke HAMASU

Design of mountain tunnel can be roughly divided into original design and modified design, and tunnel is constructed while judging necessity with modified design. On modified design the ground classification is reconsidered based on ground observation and measurement of ground displacement and supporting pattern and countermeasure will be changed accordingly. The evaluation method of ground observation is based on the Client's specification but since there are no established method to evaluate the ground displacement, individual evaluation method shall be adopted according to the site condition.

This paper will report the method to decide the tunnel support pattern "DII" and "E" from ground classification which corresponds to competence factor that were estimate from measurement of ground displacement.