

全断面早期閉合の施工管理手法に対する一考察

角湯 克典¹・鬼頭 夏樹²・大谷 達彦³・明石 健⁴

¹国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

E-mail:kadoyu-k92ta@nilim.go.jp

²正会員 西松建設株式会社 関東土木支社 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

³正会員 西松建設株式会社 土木設計部 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

⁴正会員 社団法人 近畿建設協会 技術管理部 (〒540-6591 大阪市中央区大手町1-7-31)

近年、トンネルの変形を抑制するために、全断面早期閉合を適用する施工事例が増加している。この掘削工法は、切羽から近い位置で一次インバートを施工して早期にトンネルを閉合するものであり、地山不良部でのトンネルの変形や沈下を抑制することができる。

このような状況の中、合理的に全断面早期閉合を適用するため、その効果やメカニズムを解明する研究がなされている。しかし、全断面早期閉合の施工管理手法を具体的にまとめたものは見当たらない。そこで、本論文では、施工実績に基づいて、全断面早期閉合の施工管理手法について検討した。

Key Words : early section closure, construction manager, control criteria, initial speed of displacement

1. はじめに

近年、山岳トンネル掘削時の変形抑制を目的として、補助ベンチ付き全断面掘削工法による早期閉合(以降、全断面早期閉合と称す)の適用事例が増加している。この施工法は、切羽から近い位置でインバート部に吹付けコンクリートや、鋼製ストラットを施工し(以降、本設インバート前に施工するインバートを「一次インバート」と称す)、早期にトンネル断面をリング状に閉合する工法であり、トンネルの変形や沈下を抑制することができる(写真-1)。これまでの全断面早期閉合の施工実績を整理すると、その適用理由は以下の3つに分類される。

- ①土被りが大きい不良地山における変形抑制¹⁾²⁾
- ②都市部の小土被りトンネルにおける周辺構造物への影響抑制³⁾⁴⁾
- ③坑口部の地すべり抑制⁵⁾⁶⁾

このような状況の中、合理的に全断面早期閉合を適用するため、その効果やメカニズムを解明する研究がなされている⁷⁾⁸⁾。著者らも、七尾トンネルの施工データを用いて、全断面早期閉合の効果について分析を行ってきた⁹⁾。

しかし、既往の文献においては、坑内の観察・計測に基づく全断面早期閉合の施工管理手法を具体的にまとめたものはみあたらない。そこで本論文では、この実態に一石を投じるべく、施工事例に基づいて、全断面早期閉合の施工管理手法について検討した。なおここで対象と

するのは「土被りが大きい不良地山における変形抑制」であり、これは前述した全断面早期閉合の適用理由の①に該当するものである。

本論文では、まず、全断面早期閉合の施工中における管理項目にふれた後、重要な管理項目である最終変位量について、管理基準値の設定の考え方を整理する。それに引き続き、早期に最終変位量を推定するために、初期変位速度の効果的な活用方法について議論して、初期変位速度の管理基準値の設定方法について見解を述べる。

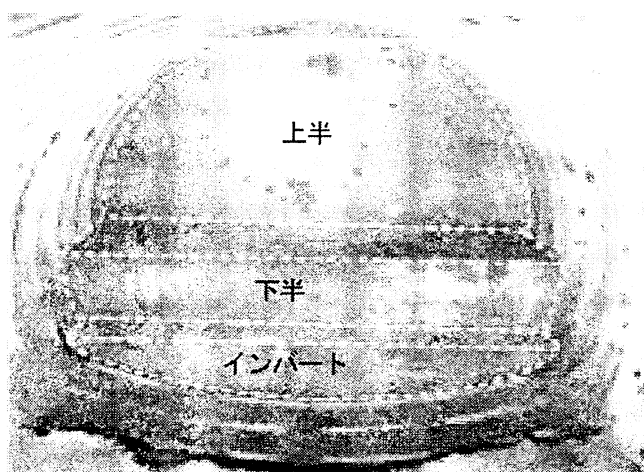


写真-1 全断面早期閉合の切羽状況

表-1 施工中における全断面早期閉合の管理項目

管理項目	意義・位置づけ
最終変位量	地山および支保の安定を把握するための重要管理項目である。
初期変位速度	掘削直後の計測値から最終変位量の目安をつける。
切羽評価点（切羽観察）	肉眼により地質を視認するとともに、計測データの妥当性を検証する。
一次インバート閉合直後の変位速度	一次インバート閉合の効果を確認する。とくに、埋戻しによって視認できなくなる一次インバートの安定性を評価する。

2. 全断面早期閉合の管理項目

表-1 に、筆者らが事例研究に基づいて提案する「施工中における全断面早期閉合の管理項目」を示す。具体的な事例研究の内容については既出の論文に譲る¹⁾。

山岳トンネルでは、一般的に、坑内変位計測によって地山と支保工の安定性を確認しながら施工を行う。そのため、変位量にかかわる管理基準値を適切に設定することが、施工管理において重要である。全断面早期閉合を適用する際、とくに、最終変位量が重要な管理項目となると考えている。

しかし、施工中の管理を念頭においた場合、最終変位量では、トンネル掘削直後に、支保工の妥当性を迅速に判断することが難しい。そのため、一般的に、初期変位速度から最終変位量を予測することが行われる。全断面早期閉合適用の際も、最終変位量の管理基準値に対応する初期変位速度を設定し、それを初期変位速度の管理基準値として施工管理に活用することを考えている。

表-1 のうち、切羽評価点(切羽観察)については、どちらかというとなりの変位データのクロスチェック項目としての役割を担うものになると考える。これは、全断面早期閉合区間では、切羽評価点はすでに大きく低下しており、切羽評価点の振れ幅が小さく、その点数の差がはっきりしなくなることがその背景にある。また、一次インバート閉合直後の変位速度については、その意義・位置付けは表-1 に示した通りである。

以下、これらの管理項目のうち、最終変位量と初期変位速度に着目し、管理基準値を設定する際の考え方や、施工実績の分析によって明らかになった特徴について順に記述する。

3. 最終変位量の管理基準値

(1) 管理基準値にかかわる問題点

トンネル坑内の最終変位量の管理基準値の代表的な設定方法には、以下のものがある⁹⁾。

- ① 過去の類似事例や試験区間の実績にもとづいて定める方法
- ② FEM 解析結果等により定める方法
- ③ 限界ひずみ法により定める方法
- ④ せん断指数およびせん断ひずみにより定める方法
- ⑤ 最終変位予測により定める方法
- ⑥ 近接構造物の保守基準等から定める方法
- ⑦ ①～⑥を組合わせて使用する方法

七尾トンネルにおいては、「③限界ひずみ法により定める方法」に基づいて最終変位量の管理基準値を設定した。そして、天端沈下 40mm、内空変位 80mm を管理基準値として、施工管理を行った。

その結果、全断面早期閉合区間において、吹付けコンクリートにひびわれが発生した。そのひびわれ状況を図-1 に示す。この図より、おおよそ、天端沈下 30mm 以上、もしくは、内空変位 60mm 以上を目安として、吹付けコンクリートにひびわれが発生したことがわかる。

限界ひずみ法は、管理基準値設定の際に考慮すべき条件が明快で、汎用性が高い方法として多用されている。しかし、全断面早期閉合を適用した区間において、限界ひずみによって設定した管理基準値に達する前に、トンネル支保工の一部を構成する吹付けコンクリートに損傷が現れたことになる。

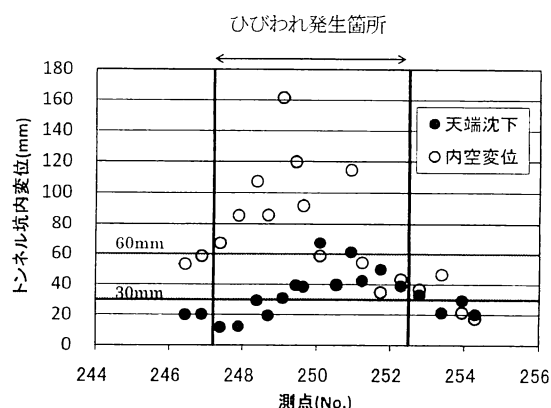


図-1 吹付けコンクリートのひびわれ発生状況

(2) 早期断面閉合の支保効果について

七尾トンネルの施工実績より、全断面早期閉合適用時には、支保工が大きな荷重を負担することを確認している¹⁾。これは、図-2の支保工特性曲線のaに示すように、支保工が大きな荷重を負担することによって、トンネル坑内変位を抑制しているものとする。一方で、この図は支保工の強度が低下し、支保工が負担できる荷重が減少した場合には、トンネルの変形が増加することを示している。吹付けコンクリートにひびわれが発生すると、支保工が負担できる荷重が減少する。そのとき、支保工は、図-2のaからbの状態に近づきトンネル坑内変位は増加し、地山の安定性も損なわれる。したがって、本来の全断面早期閉合の変形抑制効果を十分に発揮させるためには、支保工を健全な状態に維持することが重要であると考えられる。

(3) 吹付けコンクリートのひびわれ発生時のひずみの解釈について

吹付けコンクリートにひびわれが発生したときのひずみεを式(1)のように概算し、地山の安定性評価の基準値である「限界ひずみと一軸圧縮強度の関係図」¹⁰⁾に加筆した。ここでは、図-3に示す帯中央の限界ひずみを採用し、吹付けコンクリートにひびわれが発生したときのひずみ0.8%と比較した。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \delta / r \times 1 / (1 - \alpha) \times 100 \\ &= 30 / 6000 \times 1 / (1 - 0.4) \times 100 \\ &= 0.8\% \end{aligned} \tag{1}$$

- ここに、ε：吹付けコンクリートにひびわれが発生したときのひずみ
δ：七尾トンネルにおける吹付けコンクリートひびわれ発生時のトンネル壁面変位(=30mm)
r：七尾トンネルのトンネル半径(=6000mm)
α：トンネル先行変位(40%とする)

また、既往の施工実績を調査したところ、全断面早期閉合は、概ね一軸圧縮強度 0.1~3MPa の地山に適用されていることがわかった。この一軸圧縮強度の範囲を図中にあわせて示した。

この図より、全断面早期閉合が必要となるような地山では、限界ひずみ(分布帯の中央値)よりも、吹付けコンクリートにひびわれが発生したときのひずみの方が小さいことがわかる。これは、全断面早期閉合では、吹付けコンクリートにひびわれが発生しても、その時点では地山の安定は損なわれていないことを示している。つまり、全断面早期閉合では、ひびわれが発生しても即座に対応すれば地山をゆるめないことになる。

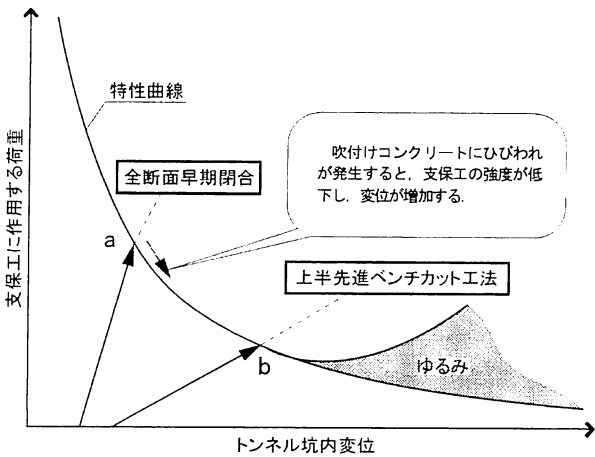


図-2 全断面早期閉合の支保効果に関わる概念図

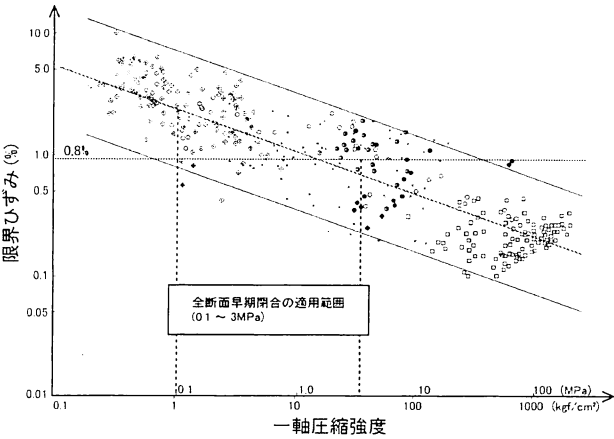


図-3 限界ひずみと一軸圧縮強度の関係 10)を一部加筆

(4) 管理基準値設定における留意点の整理

以上より、全断面早期閉合では、支保工を健全な状態に維持することによって、確実に変位抑制効果を発揮させることができると考察する。そのために、地山の安定性に加えて、支保工の安定性も考慮して、管理基準値を設定することが必要である。

また、実施工においては、吹付けコンクリートのひびわれ等が発生し、支保工の強度が低下した場合に、迅速な対策が実施できる体制を整えておくことが重要であると考えられる。

(5) 最終変位量の管理基準値設定にかかわる一提言

全断面早期閉合を適用する場合の最終変位量の管理基準値の設定方法フロー案を図-4に示す。フローの中ほどに「管理基準値(δ₀)の設定」があるが、ここに至る左上からの流れが限界ひずみ法によるもの、右上からの流れが吹付けコンクリートの安定確保にかかわる内容である。このうち、実務においては、吹付けコンクリートにひびわれ等の変状が発生するときの坑内変位の設定方法が問題となる。

筆者らが事例研究を重ねた七尾トンネルでは、前述したように、天端沈下 30mm 以上、もしくは、内空変位 60mm 以上となったときに吹付けコンクリートにひびわれが発生した。これは、1 つの施工実績から得られた値ではあるが、実務において、2 車線道路程度のトンネルの管理基準値を設定する際、目安値になると考えている。

3. 初期変位速度の管理基準値

(1) 全断面早期閉合時の初期変位速度データの分析

(a) 初期変位速度と地山状況の関係

七尾トンネル全線における初期変位速度と切羽評価点のデータを図-5 に示す。これより、全断面早期閉合区間や変状区間では、初期変位速度が非常に大きいことがわかった。また、初期変位速度と切羽評価点は一方が増えたと他方が減る関係になっていることがわかる。次に、全断面早期閉合区間と、その前後約 30m における比較的変位が大きい計測点の初期変位速度と地山評価点の関係を図-6 に示す。これによると、全体的には、初期変位速度が大きくなると切羽評価点が小さくなる傾向を示すことがわかる。しかし、全断面早期閉合区間のデータ(丸で囲んだデータ)に限定すると、初期変位速度と切羽評価点の間に明瞭な関係は認められない。これは、前述したように、全断面早期閉合区間での切羽評価点はすでに大きく低下しており、切羽評価点の振れ幅が小さいため、初期変位速度との関係が把握できにくいものと考えられる。

(b) 初期変位速度と最終変位量の関係

当該トンネルにおける初期変位速度と最終変位量の関係を図-7、図-8 に示す。これらのデータは、図-6 と同様に、全断面早期閉合区間と、その前後約 30m における計測データである。まず、全断面早期閉合区間と上半先進ベンチカット工法区間のデータを比較すると、全断面早期閉合区間の回帰直線は上半先進ベンチカット工法区間に比べて傾きがゆるやかになっていることがわかる。これは、同じ初期変位速度であれば、全断面早期閉合を適用することによって、最終変位量が小さくなることを裏付ける結果である。

つぎに、全断面早期閉合区間の天端沈下(図-7)と内空変位(図-8)のそれぞれの回帰直線を比較すると、内空変位の回帰直線の傾きがよりゆるやかになっており、上半先進ベンチカット工法のデータと比べてその差がはっきりしている。全断面早期閉合において、初期変位速度に対する最終変位の低減効果は、内空変位の方が大きい可能性がある。

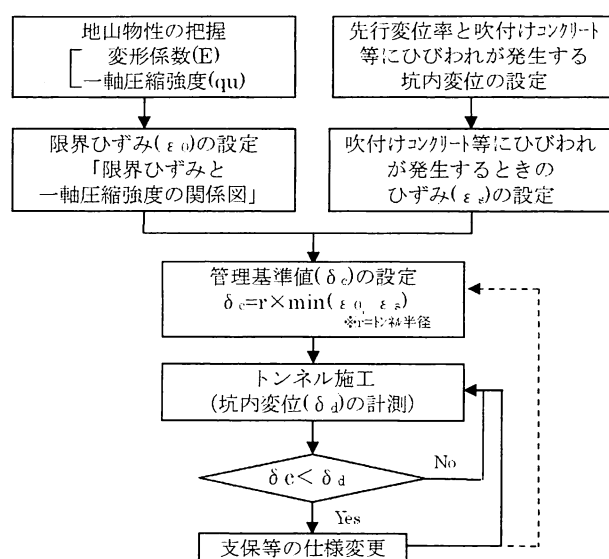


図-4 全断面早期閉合区間における管理基準値の設定手順にかかわる一試案

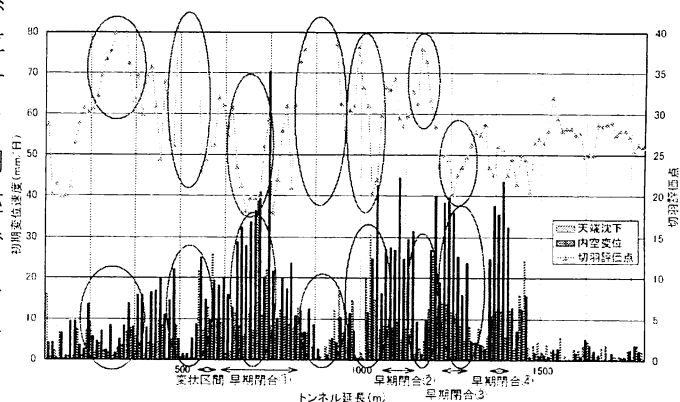


図-5 初期変位速度と切羽評価点一覧

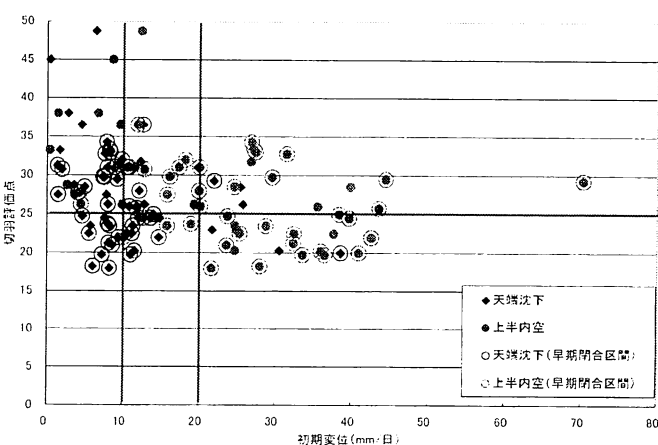


図-6 初期変位速度と切羽評価点の関係

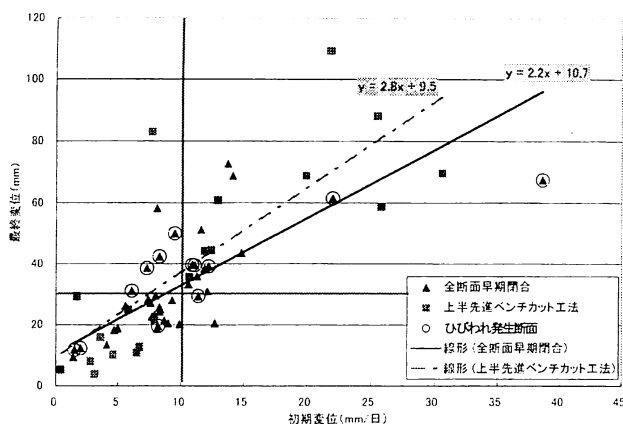


図-7 初期変位速度と最終変位量の関係(天端沈下)

また、全断面早期閉合区間において、吹付けコンクリートにひびわれが発生した箇所のデータを図-7 および図-8 にプロットした。その結果、それらの多くが回帰直線の左上側に分布し、回帰直線の傾きを大きくしていることがわかった。すなわち、吹付けコンクリートにひびわれが発生することによって、初期変位速度に対する最終変位量の低減効果が小さくなることがわかった。このことから、吹付けコンクリートのひびわれの発生を抑制することが、トンネル変位の抑制につながる事がわかる。

(2) 初期変位速度の管理基準値について

図-1 に示したように、吹付けコンクリートにひびわれが発生するときの最終変位量は、天端沈下 30mm、内空変位 60mm であった。そこで、図-7 および図-8 に、この値を示して回帰直線との交点を求め、その交点の値が、初期変位速度の管理基準値の目安になると考えた。また、七尾トンネルの施工実績も踏まえ、天端沈下 10mm/日、内空変位 20mm/日を目安値とした。

実施工においては、まず、全断面早期閉合開始時に、初期変位速度の目安値(天端沈下 10mm/日、内空変位 20mm/日)と最終変位量の目安値(天端沈下 30mm、内空変位 60mm)を参考にして、管理基準値を設定することを提案する。そして、全断面早期閉合開始後は、施工実績をフィードバックして、初期変位速度と最終変位量の管理基準値を見直す必要がある。たとえば、図-7、図-8 のような、横軸が初期変位速度、縦軸が最終変位量とした管理図を作成することが考えられる。この管理図に計測データをプロットして、管理基準値を超えたときには支保工の変状の有無にかかわらず支保工のランクアップを検討するべきと考える。さらには、今回の検討を踏まえて、管理基準値以下であるにもかかわらず支保工に変状が現れたときには、管理基準値を小さな値に見直す必要があると判断できる。

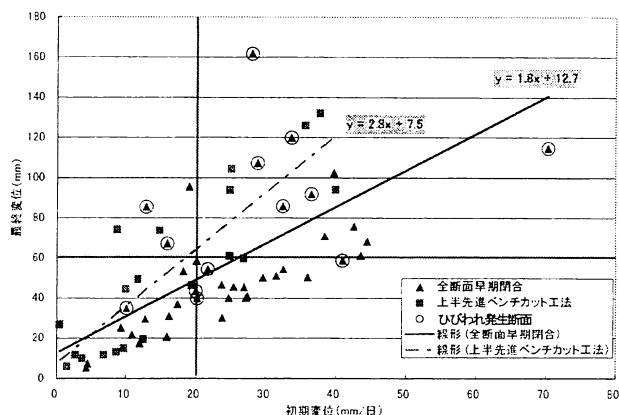


図-8 初期変位速度と最終変位量の関係(内空変位)

4. おわりに

本論文では、全断面早期閉合を適用したときの施工管理手法について検討した。

まず、施工中における全断面早期閉合の管理項目をまとめた。そして、とくに重要な管理項目である最終変位量に関する管理基準値について検討を行った。その結果、全断面早期閉合では、変位抑制効果を確実に発揮させるために、トンネル支保工を健全な状態に維持することが重要であるという知見を得た。そして、地山およびトンネル支保工の両方の安定性を考慮して、管理基準値を設定することが重要であるという見解を述べ、一試案ではあるが、具体的な管理基準値の設定手順について提言を行った。

また、施工時に迅速な対応を行うために、初期変位速度を積極的に活用することが効果的である。そこで、初期変位速度に関する管理基準値について検討を行った。その結果、実施工において初期変位速度の管理基準値を設定するための目安値を示すとともに、全断面早期閉合開始後に得られる施工実績をフィードバックして、管理基準値を見直ししながらトンネル掘削を行うことが必要であることを述べた。

全断面早期閉合の施工管理方法は、安全性と経済性を考慮して検討する必要がある、非常に難しい課題である。今後も、様々な観点から、合理的な全断面早期閉合の施工管理方法について検討を行っていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 角湯克典, 柳川磨彦, 鬼頭夏樹, 大谷達彦: 地山状況の変化に対応し全断面早期閉合の仕様を設定, トンネルと地下, 第 42 巻 4 号, 2011.4.
- 2) 高橋俊長, 大村修一, 高田篤, 山田浩幸: 蛇紋岩地山を早期閉合と二重支保で変位制御, トンネルと地下, 第 41 巻 5 号, 2010.5.

- 3) 多田浩治, 津野和宏, 石丸潔, 亀谷英樹: 構造物直下の双設トンネルを早期閉合により施工, トンネルと地下, 第 43 巻 7 号, 2012.7.
- 4) 照屋正史, 高良哲治, 駒谷恒雄, 森崎泰隆: 民家直下で超近接トンネルを全断面早期閉合により施工, トンネルと地下, 第 38 巻 7 号, 2007.7.
- 5) 平野宏幸, 臼田芳彦, 清水則一, 神澤幸治, 宮田和: 長尺鏡ボルトと早期断面閉合を用いた地すべり地直下のトンネル施工, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム 併催: 第 29 回西日本岩盤工学シンポジウム, pp.903-907, 2008.1.
- 6) 中野清人, 佐藤諭一, 本藤敦: 蛇紋岩地すべり脆弱部を早期閉合で掘削, トンネルと地下, 第 41 巻 3 号, 20010.3.
- 7) 真下英人, 水川雅之, 日下敦: トンネル早期閉合効果に関する解析手法, トンネル工学報告集, 第 17 巻, 2007.11.
- 8) 小川澄, 楠本太: 早期閉合の効果を施工事例および数値解析より検討, トンネルと地下, 第 43 巻 2 号, 2012.2.
- 9) 土木学会: 2006 年制定 トンネル標準示方書 山岳工法・同解説, p.37, 2006.7.
- 10) 櫻井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文集, 第 317 号, 1982.1.

(2012.9.3 受付)

A STUDY ON THE CONSTRUCTION MANAGEMENT OF EARLY SECTION CLOSURE

Katsunori KADOYU, Natsuki KITO, Tatsuhiko OTANI and Takeshi AKASHI

Recently, the early section closure is adopted for restraining deformation of tunnel. In this method the early invert closure in a short distance from tunnel face could restrain deformation and subsidence of tunnel.

In this situation, the effect of early section closure has been studied. Therefore, the method of construction management of early section closure has not been studied. In this paper, authors proposed the method of construction management of early section closure.