

# 既設トンネルの断面拡幅時の挙動計測

## BEHAVIOR OF EXISTING TUNNELS DURING ENLARGEMENT OF CROSS SECTION

石村利明\*・真下英人\*・森本 智\*

Toshiaki ISHIMURA, Hideto MASHIMO and Satoshi MORIMOTO

With upsizing of vehicles, or increase of traffic volume in recent years, the number of tunnels in which passage of two vehicles and passage of a pedestrian are difficult due to the narrow cross sections has increased, and many existing tunnels have been reconstructed by enlarging their cross sections. However, the support structure of enlarged existing tunnels has been designed by reference to the support structure of new tunnels and more rational design method of structure is needed. In this research, in order to grasp the behavior of the support structure during enlargement of existing tunnels' cross sections, the stress occurred in the support structure of existing tunnel and enlarged tunnel was measured.

**Key Words:** cross-sectional existing tunnel, tunnel support structure, on-site measurement

### 1. はじめに

近年の車両の大型化や交通量の増大に伴って、トンネル内での車両のすれ違いや歩行者の通行が困難な断面の狭いトンネルが増えてきている。また、老朽化や地山状態の変化などにより、覆工コンクリート等に変状が発生し、覆工を打ち直すなどの改築にせまられるトンネルなど、既設トンネルを断面拡幅・改築する必要性が高まっている。しかし、断面拡幅・改築時のトンネルの支保構造は、新設トンネルの設計方法に準拠して新設トンネルと同規模の支保構造を採用している場合が多いものの、特に明確な設計方法がないのが現状である。そのため、既設トンネルが存在することによる先進導坑としての効果や既設トンネル掘削によるトンネル周辺部の緩み域の存在などを考慮した、より合理的な断面拡幅・改築用のトンネル支保構造の設計方法が求められている。

本研究では、断面拡幅・改築を行うトンネルの支保構造の設計方法の確立に必要な基礎的なデータを収集することを目的として、断面拡幅を行ったトンネルにおいて、既設トンネルの変形・覆工のひずみ、拡幅トンネルの支保部材に作用する応力等の計測を行った。ここでは、計測の概要とその結果について述べる。

### 2. 現場計測の概要

現場計測は表-1に示す4本のトンネルで実施した。いずれも既設トンネルの断面拡幅工事であり、A～Cトンネルでは車両を通しながらの活線施工である。A・Bトンネルは、断面拡幅掘削時の既設覆工への影響把握のため覆工表面ひずみ、天端および内空変位測定を、また、拡幅トンネルの支保構造の挙動を把握するための鋼アチ支保工応力、吹付けコンクリート応力ならびにロックボルト軸力の計測を行った。さらにBトンネルにおいては、一部側壁部に斜めにロックボルトを打設した区間での計測を実施し、斜め打設の影響を把握した。さらに、C・Dトンネルは事前補強として断面拡幅掘削前に打設したロックボルトについて、その効果を確認するためのロックボルト軸力測定を行った。以下、各トンネルについてトンネル概要、計測項目および方法、計測結果を示す。

表-1 計測トンネル一覧

| トンネル名                    | Aトンネル           | Bトンネル                               | Cトンネル                               | Dトンネル           |
|--------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| 既設トンネル工法                 | 在来工法<br>1973年供用 | 在来工法<br>1950年供用                     | 在来工法<br>1962年供用                     | 在来工法<br>1938年供用 |
| 延長(m)                    | 975.0           | 115.5                               | 148.0                               | 81.9            |
| 内空幅(m)                   | 9.8             | 6.0                                 | 6.0                                 | 6.0             |
| 内空高さ(m)                  | 6.3             | 4.9                                 | 5.0                                 | 5.1             |
| 覆工厚(cm)                  | 50～70           | 30                                  | 35                                  | 30              |
| 拡幅トンネル工法                 | NATM            | NATM                                | NATM                                | NATM            |
| 延長(m)                    | 170             | 120                                 | 148                                 | 102             |
| 内空幅(m)                   | 15.6            | 12.5                                | 9.75                                | 12.5            |
| 内空高さ(m)                  | 8.0             | 7.0                                 | 7.1                                 | 7.0             |
| 覆工厚(cm)                  | 45.40           | 30.35                               | 30                                  | 30.35           |
| 主な地質                     | 砂岩、頁岩、凝灰岩互層     | 泥岩                                  | 安山岩                                 | シルト質泥岩          |
| 地山強度(N/mm <sup>2</sup> ) | 16～30           | 1～9                                 | 13.150                              | 4～10            |
| 最大土盛り(m)                 | 約38             | 約38                                 | 約42                                 | 約30             |
| 掘削方式                     | 機械掘削            | 機械掘削                                | 機械掘削                                | 機械掘削            |
| 計測項目                     | 既設覆工の計測         | 覆工のひずみ<br>天端沈下<br>内空変位              | —                                   | —               |
|                          | 新設覆工の計測         | 鋼アチ支保工応力<br>吹付けコンクリート応力<br>ロックボルト軸力 | 鋼アチ支保工応力<br>吹付けコンクリート応力<br>ロックボルト軸力 | —               |
|                          | 事前ロックボルトの計測     | —                                   | —                                   | ロックボルト軸力        |

\* 正会員 独立行政法人 土木研究所 基礎道路技術研究グループ (トンネル)

### 3. Aトンネル

#### 3. 1 トンネル概要

Aトンネルは、1973年に在来工法によって施工されたトンネルであり、坑口部170m区間を現在の2車線から3車線に断面を拡幅するものである。トンネル周辺の地質は、砂岩、頁岩、凝灰岩の互層からなる。坑口150m付近のホ-リングコアによる地山の圧縮強度は約16~30N/mm<sup>2</sup>が得られている。なお、拡幅トンネルの支保構造は、新設トンネルの3車線断面に適用される標準支保パターンに準拠して決定された。

#### 3. 2 計測項目および計測方法

Aトンネルの既設覆工の計測は、図-1(a)に示す計測断面4、5において図-1(b)に示すようにプロテクタ上部の空間を利用して天端付近およびア-チ肩部にひずみゲ-ジを貼付し、覆工のひずみを計測するとともに、壁面間の2点間距離を変位計により4測線の内空変位、天端沈下計測を行った。一方、拡幅トンネルの支保構造の計測は、計測断面1~4において図-1(c)に示す各点で鋼ア-チ支保工応力、吹付けコンクリート応力ならびにロックボルト軸力を行った。

#### 3. 3 計測結果

##### (1) 既設覆工の計測結果

計測断面4と計測断面5の切羽の進行に伴う既設覆工コンクリートの円周方向のひずみ、内空変位量、天端沈下を図-2に示す。

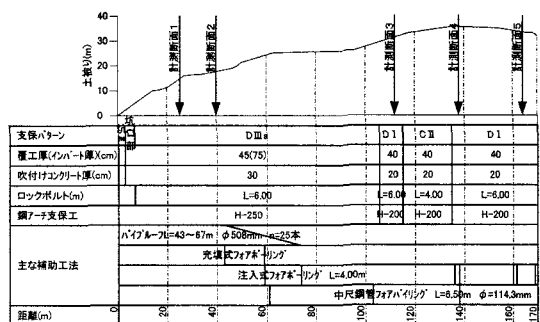
計測断面4では、覆工コンクリートの円周方向のひずみは切羽が30m(2D、D:拡幅後のトンネル幅)程度で一旦増加し、さらに15m(1D)程度まで近づくと再び増加傾向を示す。内空変位は25m(1.5D)程度まで切羽が近づくと水平測線および左・右斜測線の変位が、円周方向のひずみの変化に対応して変化し、切羽が15m(1D)程度まで近づくと、それまで拡大傾向にあった内空変位が全体的に収縮側に

に変化しており、掘削による影響が現れている。ただし、天端沈下の変化は認められない。計測断面5では、覆工コンクリートの円周方向のひずみは、切羽が25m(1.5D)程度まで近づくと顕著な増加傾向を示し、さらに切羽が3m程度まで近づくと急激な増加を示す。内空変位は、25m程度まで切羽が近づくと水平測線および左・右斜測線の変位が縮小側へ変化し、切羽が10m(0.6D)程度近づくと天端沈下が地山側へ隆起する方向へ変化している。

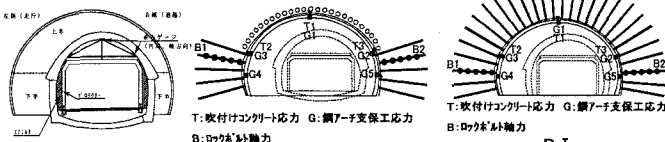
##### (2) 拡幅トンネルの支保構造の計測結果

##### 1) 天端変位および内空変位

図-3に天端変位および内空変位の最終値を示す。坑口付近の計測断面1、2は、土被りが20m程度以下と薄く、内空変位はそれほど大きくないものの天端変位は大きく、沈下卓越型の変状を示した。この区間は、



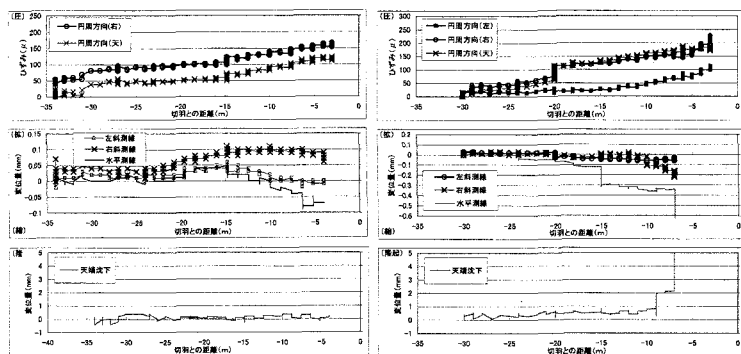
(a) Aトンネル縦断面図



(b) トンネル断面図

(c) 拡幅計測断面図

図-1 Aトンネルの計測概要図



(a) 計測断面4

(b) 計測断面5

図-2 既設覆工の計測結果

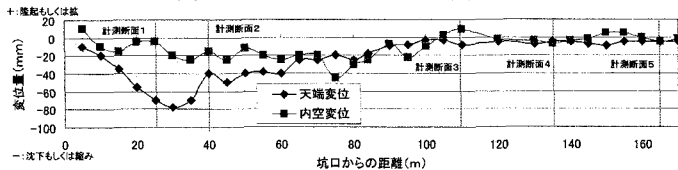


図-3 天端沈下および内空変位結果

建設当初より地質が悪く、天端上部にゆるみ域が確認されたため、当初設計よりパイプ・ラフ工法を採用したDⅢa区間であった。一方、坑口より100m以上の距離にある計測断面3、

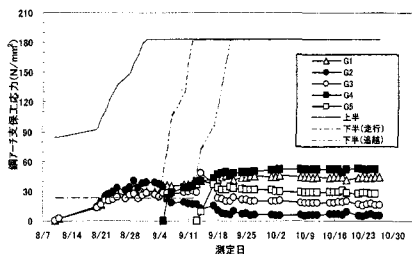


図-4 鋼アチ支保工応力の経時変化 (計測断面3)

4は、長さ6.5mの注式中尺鋼管「アチ・リンク」を採用したDⅠ区間であったが、天端沈下および内空変位ともに10mm以内であり、DⅠ区間としては比較の変位が小さい結果となった。

## 2) 鋼アチ支保工応力および吹付けコンクリート応力

図-4、5に計測断面3の鋼アチ支保工応力および吹付けコンクリート応力の経時変化を示す。それぞれ天端の測点を除き、支保建込み後、徐々に応力が増加するものの下半掘削の影響により一旦低下し、その後、再び増加する傾向を示す。ただし、増加後のそれぞれの支保に発生する応力はともに小さい。他の計測断面でも経時変化の挙動はほぼ同様であった。図-6に各支保の収束したと考えられる最終値を示す。鋼アチ支保工応力は、土被りが20m程度以下と薄い計測断面1、2の一部の測点では約240N/mm<sup>2</sup>程度と比較的大きな応力となっている。土被り30m程度以上の計測断面3、4では支保パターンはともにDⅠであるが、一部の測点で最大約60N/mm<sup>2</sup>の応力となっているものの、全体的に見れば20~30N/mm<sup>2</sup>の応力と比較的小さい。吹付けコンクリート応力も土被りの薄い地点で約10N/mm<sup>2</sup>を超える部分があるが、他は4N/mm<sup>2</sup>以下と小さい。

## 3) ロックボルト軸力

図-7にロックボルト軸力を示す。鋼アチ支保工応力、吹付けコンクリート応力が大きい計測断面2では、B2のボルト中央部で最大軸力120kN程度が発生している。しかし、計測断面4のロックボルト軸力はいずれも壁面近傍で最大60kN以下と小さい。

以上より、土被りが薄い部分で鋼アチ支保工応力、吹付けコンクリート応力の一部が高くなる場合があるが、ある程度の土被り以上の場合には、各支保の応力は小さく、また、ロックボルト軸力も小さいことから、支保構造の規模としては耐力に十分余裕があるといえる。

## 4. Bトンネル

### 4. 1 トンネル概要

Bトンネルは、1950年に在来工法によって施工された幅員6m程度の狭隘断面のトンネルであり、大型車のすれ違いが困難なことから、断面を拡幅するものである。トンネル周辺の地質は、塊状の泥岩が主体であり、全体的に弱風化となっている。アチ・リンク工による地山の圧縮強度は1~9N/mm<sup>2</sup>が得られている。

### 4. 2 計測項目および計測方法

Bトンネルの既設覆工の計測は、図-8に示す計測断面1、2の2地点でアチ・リンク上部の空間を利用して天端沈下、内空変位の計測を実施した。拡幅トンネルの支保構造の計測は、坑口部DⅢa区間の計測断面1、支保パターンDⅠ区間の計測断面2、3の各断面で鋼アチ支保工応力、吹付けコンクリート応力ならびにロックボルト軸力の計測実

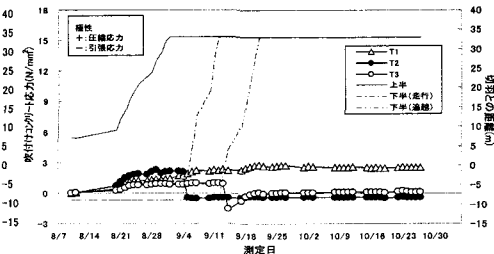


図-5 吹付けコンクリート応力の経時変化 (計測断面3)

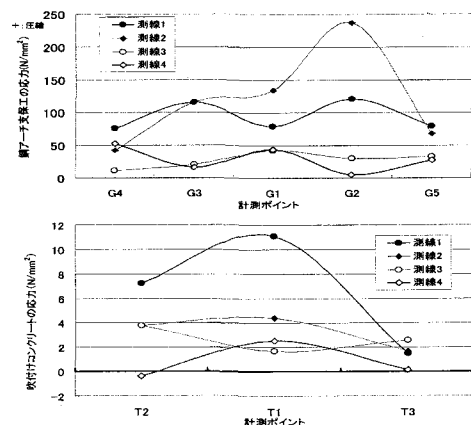


図-6 各支保部材の最終値

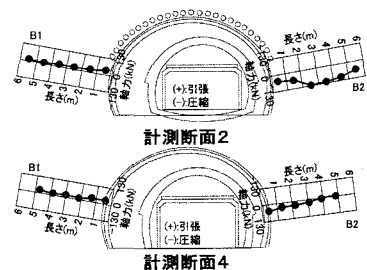


図-7 ロックボルト軸力

施した。計測断面 2 では試験的に計測断面をほぼ中心としてトンネル延長方向 10m の区間に両側壁部 5 本のロックボルトを通常のロックボルトと同じ材質・長さのボルトを斜め前方 45 度に打設し、計測断面 3 との比較を行った。施工手順は、上半掘削、下半左掘削、下半右掘削、下半左下掘削、下半右下掘削の順に実施した。

#### 4. 3 計測結果

##### (1) 既設覆工側の計測結果

既設覆工の天端沈下の測定結果を図-9 に示す。両計測断面での天端沈下はともに 0.5mm 以内と非常に小さい。また、内空変位も 0.2mm 以内と非常に小さい値であった。本計測結果からは拡幅トンネルの切羽の進行に伴う顕著な変化は認められなかった。

##### (2) 拡幅トンネルの支保構造の計測結果

###### 1) 天端変位および内空変位

拡幅トンネルの天端沈下、内空変位を図-9 に示す。天端沈下量は、坑口部 DⅢa およびトンネル中央付近の支保パターン DⅠ区間においても最大約 20mm 以内と小さい。内空変位は、計測位置により異なり、計測断面 1 でほぼゼロ、計測断面 2 で地山側へ、計測断面 3 で内空側へそれぞれ変化した。

###### 2) 鋼アチ支保工応力および吹付けコンクリート応力

図-10、11 に計測断面 2 の鋼アチ支保工応力および吹付けコンクリート応力の経時変化を示す。鋼アチ支保工応力は、切羽の進行に伴って増加する傾向を示し、特に G1 および G3 の応力が高くなっている。一方、吹付けコンクリート応力は、2N/mm<sup>2</sup> 以下と全体的に小さく、切羽進行に伴う掘削による顕著な変化は認められない。

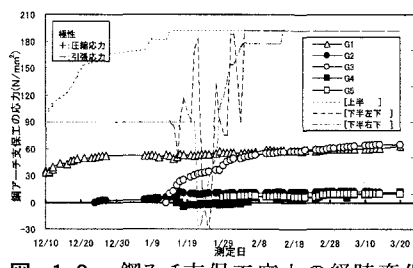
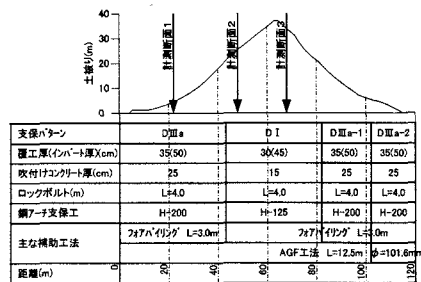


図-10 鋼アチ支保工応力の経時変化 (計測断面 2)

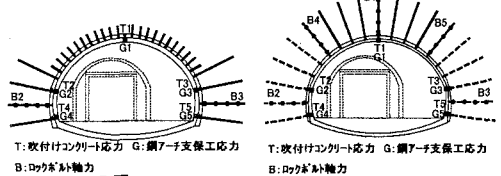
図-12 に各支保の収束したと考えられる最終値を示す。図より、鋼アチ支保工応力は、土被り約 10m 以下の計測断面 1 と土被り約 30m の計測断面 3 では、それぞれ最大で約 60N/mm<sup>2</sup>、約 30N/mm<sup>2</sup> と土被りの小さい計測断面 2 が大きい。また、斜めにロックボルトを打設した区間の計測断面 2 の応力は坑口付近と同程度となり若干計測断面 3 より大きいが、支保耐力に対して十分余裕のある範囲に収まっている。また、吹付けコンクリート応力についても最大で約 4N/mm<sup>2</sup> 程度と小さく、各支保部材には大きな荷重は作用していないものと考えられる。

###### 3) ロックボルト軸力

図-13 に収束したと考えられる計測断面 1～3 のロックボルトの軸



(a) Bトンネル縦断面図



---は斜めにロックボルトを打設(計測断面2を含む10m区間)

(b) 計測断面図 DⅠ

図-8 Bトンネルの計測概要図

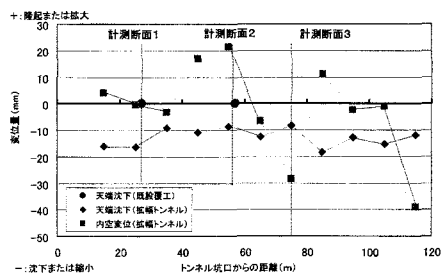


図-9 天端沈下および内空変位

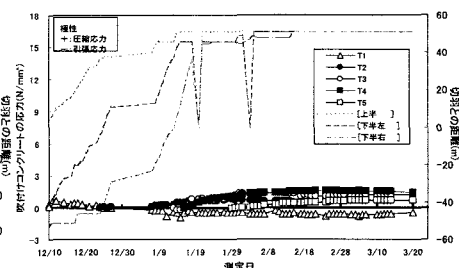


図-11 吹付けコンクリート応力の経時変化 (計測断面 2)

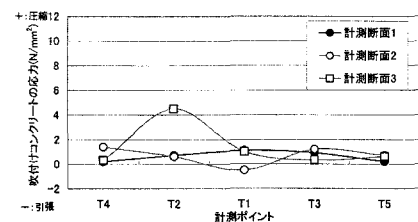
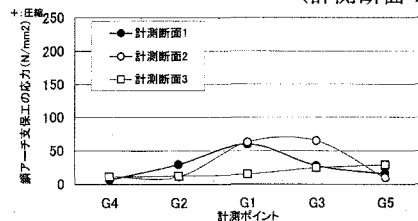


図-12 各支保部材の最終値

力分布を示す。軸力は全ての計測断面ともに引張側で最大 20kN 程度と極めて小さい値を示しており、側壁部については打設角度による顕著な差は認められない。

以上より、側壁部のロックボルトを斜めに打設した場合でも、鋼アーチ支保工応力の一部で高い値が発生したものの支保部材の耐力に対して十分余裕のある状態であり、ロックボルトの軸力も壁面に垂直に打設した場合と斜めに打設した場合とで顕著な差が認められないことから、本トンネル条件下では側壁部の一部を斜めに打設してもその影響は小さいものと考えられる。

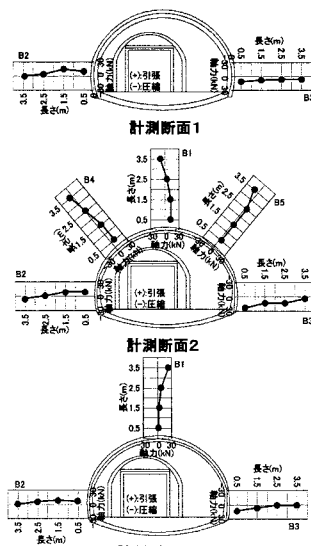


図-1 3 ロックボルト軸力

## 5. Cトンネル

### 5. 1 トンネルの概要

Cトンネルは、1962年に在来工法によって施工された幅員 6m 程度の狭隘断面のトンネルであり、大型車のすれ違いが困難なことから断面を拡幅するものである。トンネル周辺の地質は、安山岩を主体とした地山の圧縮強度が平均 150N/mm<sup>2</sup> 程度の塊状であり、地山の一部に平均 13N/mm<sup>2</sup> 程度の破碎・風化部が介在している。

### 5. 2 計測項目および計測方法

Cトンネルでは、図-1 4 に示すように掘削前に天端部に補強目的で全線に渡り長さ 3m の FRP 製のロックボルトを打設した。ロックボルトの軸力は、計測断面のみに打設した長さ 6m の 3 本のロックボルトに対して測定した。計測断面は、ほぼ中央の位置で実施した。なお、施工は既設トンネルの舗装および路盤採石を全線に渡り撤去した後に、トンネルの拡幅掘削を実施した。

### 5. 3 計測結果

図-1 5 に路盤掘削からトンネル掘削によりロックボルトが切断されるまでの天端 (B2) のロックボルト軸力の経時変化を示す。図から、路盤掘削とともにすべてのロックボルトで引張力が発生している。これは、路盤掘削により覆工が下方に変形したことに対応したものと考えられる。一方、トンネル拡幅掘削時はほぼ全体に切羽が近づくに伴い圧縮力が発生した。軸力分布から、路盤掘削にともないトンネル周辺 2~3m まで 60~70 kN と比較的大きな引張軸力が発生している。図-1 6 は、天端のボルトのトンネル拡幅による影響を見るため、天端のボルト (B2) についてトンネル拡幅前のデータを基準 (軸力=0) として、切羽との距離で整理するとともに、トンネル拡幅前および計測断面におけるトンネル拡幅直前時のロックボルトの軸力分布を示す。切羽との影響を詳しく見ると、切羽が 10m

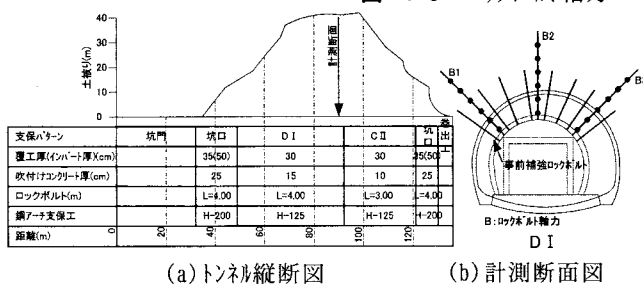


図-1 4 Cトンネルの計測概要図

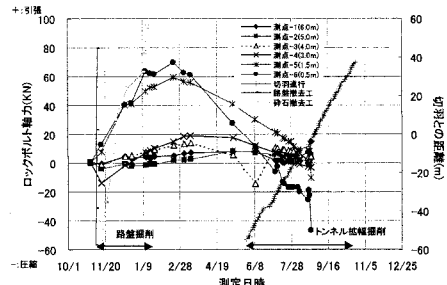


図-1 5 拡幅時のロックボルト軸力変化 (B2)

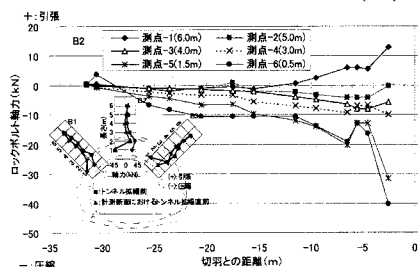


図-1 6 ロックボルト軸力

(1D) 程度の接近した段階から軸力に有意な変化が見られ、圧縮力が増加している。さらに、2.5m (0.25D) 程度からはその変化は急激に増加し、拡幅に伴う既設トンネルの影響範囲としては 1D 程度と考えられる。また、ロックボルトの軸力分布図から、トンネル拡幅時に切羽接近に伴いトンネル周辺 3m 程度まで圧縮力が発生

し、トンネル壁面近傍が最大となっているのが特徴的である。

## 6. Dトンネル

### 6. 1 トンネルの概要

Dトンネルは、1938年に在来工法によって施工された幅員6m程度の狭隘断面のトンネルであり、大型車のすれ違いが困難なことから、トンネル拡幅するものである。トンネル周辺の地質は、塊状の泥岩が主体であり、全体的に弱風化となっている。ボールドコアによる地山の圧縮強度は4~10N/mm<sup>2</sup>が得られている。

### 6. 2 計測項目および計測方法

計測は図-17に示すようにトンネルの中央付近の支保ハタンD I区間10mに事前に3本のロックボルトの打設を行い、ほぼ中間の1断面で既設トンネルの拡幅掘削時におけるロックボルトの挙動計測を行った。なお、事前に打設したロックボルトは、削孔径φ50mmの全面接着方式の自穿孔ロックボルトであり、拡幅トンネルのハタンボルトの一部として使用するため、拡幅掘削に伴い切羽が到達した段階で拡幅断面掘削部分のロックボルトの一部を一時的に切断して計測を継続した。

### 6. 3 計測結果

図-18にロックボルト(B2)の切羽の進行に伴う経時変化と切羽通過直前および収束したと考えられるロックボルト軸力分布を示す。図より、当初は切羽の進行に伴って大きな軸力の変化は認められないが、その後、切羽通過後に引張軸力が増加し10~20m程度切羽が通過後にある一定の値に収束している。この軸力の変化は、事前にロックボルトを打設することで、切羽掘削時に天端から肩部にかけて地山掘削に伴う地山の変形を抑制する効果などが期待できることを示しているものと考えられる。なお、本トンネルの拡幅掘削時の内空変位は、最大で約5mm程度と非常に小さい結果であった。ロックボルトの軸力は深度3.36m付近(ボルト切断後はトンネル壁から1.5m)で最大値を示した。他の2本のロックボルトの切羽進行時の経時変化もほぼ同様であり、また、各ロックボルトとも最終的に最大でも20kNと非常に小さい軸力しか発生していない。

## 7. まとめ

断面拡大を実施した4本のトンネルにおける現場計測結果から、次のことが明らかとなった。

- (1) 断面拡幅による既設トンネルへの影響範囲は、最大でも切羽前方1.5D~2D程度までである。
- (2) 断面拡幅トンネルの鋼アチ支保工、吹付けコンクリートに発生する応力は、土被りが薄い坑口部等で一部高くなる場合があるが、ある程度の土被り以上の場合は比較的小さい。
- (3) 断面拡幅トンネルのロックボルトに発生する軸力は小さい。また、側壁部にロックボルトを斜めに打設した場合とトンネル壁面に打設した場合との顕著な差は認められない。
- (4) 断面拡幅前に補強目的で事前にロックボルトを打設した場合、切羽掘削時に天端から肩部にかけて地山の変形抑制の効果が期待できる。

## 謝辞

本研究の実施にあたり国土交通省関東地方整備局千葉国道事務所、北海道開発局小樽開発建設部、福岡北九州高速道路公社、佐藤工業(株)より貴重なデータを提供していただきました。この場を借りて感謝の意を表します。

