

双設トンネルにおけるトンネル荷重発生機構に関する研究 計測管理方法と計測結果について

－高知自動車道（四車線化）桧生トンネル工事における計測事例－

Study on the tunnel load generation mechanism of twin tunnel

- Case study of Hinokio Tunnel (Phase II) Project on the Kochi Expressway -

溜渕 孝治¹⁾・笠松 弘治²⁾・小川 澄²⁾・畔高伸一³⁾・伊藤省二⁴⁾

Kouji TAMARIBUCHI, Hiroji KASAMATSU, Kiyoshi OGAWA, Shinichi AZETAKA and Shoji ITO,

For expansion to four lanes of the Kochi Expressway, The Hinokio Tunnel Project was drawn up to construct a new tunnel parallel to an existing tunnel. The zones of weak ground that had experienced significant displacements in Phase I construction were prone to fail under the influence of the new tunneling. For monitoring the influence exerted by Phase II excavation upon the existing tunnel, this tunnel side was instrumented in advance. By the monitor scheme, safety of work was achieved. The measurement results are helpful for grasping the tunnel load generation mechanism

Key Words : twin tunnel, measurement

1. はじめに

既設トンネルに近接して新設トンネルが施工される場合、特に地山条件が悪く既設トンネル施工時に大きな変位を生じた区間では、新設トンネル施工時の掘削による影響を受け、既設トンネルが新設側に引っ張られるような変形をしたり、既設トンネル周辺の塑性領域が広がり、既設トンネルへ新たな荷重となって作用し、トンネルの安定性を失うような現象が生じると考えられている。

そこで、高速道路の4車線化工事に伴い供用中の既設トンネルに新設トンネルを併設して建設する工事において、供用中の既設トンネルの安全を確保する事を目的とし、新設トンネルの接近に伴う周辺地山挙動とその影響度合いを把握するため、既設（以下、I期線という）トンネルに事前に計測器を設置しその計測管理を行った。

本報告は、計測結果に基づいて新設（以下、II期線という）トンネル接近に伴う周辺地山の变形挙動の特徴について示し、これらの結果より、双設トンネルにおけるトンネル荷重発生メカニズムについて考察した。以下に、その概要について報告する。

-
- 1) 日本道路公団 四国支社 建設部 建設第二課
 - 2) 日本道路公団 四国支社 高知工事事務所
 - 3) 正会員 ㈱熊谷組 土木本部トンネル技術部
 - 4) ㈱熊谷組・㈱松村組 桧生トンネル工事共同企業体

2. 施工概要

2-1. 工事概要

松生トンネル（II期線）工事は、高知自動車道の路線のなかで四国山地のほぼ中央部にあたる高知県長岡郡大豊町に位置し、延長 $L=2,541\text{m}$ 、掘削断面積約 80m^2 の道路トンネルである。

II期線トンネルは、供用中のI期線トンネルの西側にトンネル中心離れ3D（D：トンネル掘削径）で、ほぼ南北にいたる線形で計画されており、日本でも有数の地質弱帯である御荷鉾構造線を貫く工事である。

2-2. 地形・地質概要

(1) 地形

松生トンネルは、吉野川の支流である穴内川と小川谷川に挟まれた山岳地域に位置し、西方約5.0 Kmにある四国山地の一峰 国見山（1,089 m）に続く東方向の傾斜面の下を通過する。トンネル通過地周辺の標高は350m～520m程度で、土被りは坑口部を除き大部分は100m～190m程度である。今回報告するF5'断層地点における土被りは、約150mである。

(2) 地質

本トンネルの地質はF3断層を境界として北側350mは「三波川帯」、それより南側は「御荷鉾帯（御荷鉾緑色岩類）」が分布する。三波川帯の構成岩類は、おもに泥質片岩・砂質片岩・礫質片岩・塩基性片岩・珪質片岩・石灰質片岩などの結晶片岩類からなり、そのほか変斑レイ岩・かんらん岩・蛇紋岩や、キースラーガー型鉱床を伴う。当地区の三波川帯としては泥質片岩・石灰岩質片岩・泥質片岩・珪質片岩が分布している。

御荷鉾緑色岩類は、弱変成を受けた火山碎屑岩類・火山岩類よりなり、構成岩種としては塩基性凝灰岩、集塊岩、凝灰角れき岩の互層と、これらの間に分布する斑レイ岩、輝緑岩、玄武岩よりなる。当地区では輝緑岩質緑色岩、千枚岩質緑色岩、集塊岩質緑色岩と称しており、岩質自体は本来堅硬であるものの、全体的に断層運動に伴って地質構造が乱れている。

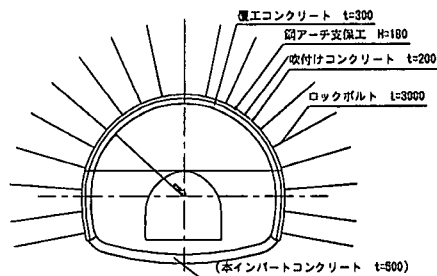
(3) F5' 断層

水平ボーリング調査による地質調査結果等より、F5'断層破碎帯は、御荷鉾構造線に大きな影響を受けたと考えられる多数の断層が集合して全体的に破碎状となっていることが判明した。また、F5'断層内の御荷鉾緑色岩類は、膨脹性粘土鉱物であるスメクタイトを多量に含むとともに、水によるスレーキングを起こしやすく、クリープ特性を有する地山であることが予測された。また地山自体の強度が小さく、大きな土被りになると塑性化し易いものと考えられた。

3. 施工概要

3-1. I期線施工状況（記録）

昭和61年に竣工したI期線トンネルの施工記録によれば、このF5'断層付近は、約40mほどの強破碎帯部を挟んで両側に大小の破碎帯が多数集合して全体的に破碎状を呈している区間であり、D3-1支保パターンで施工されている。図-3.1に支保パターン図を示す。またこの付近では、破碎され粘土化した緑泥石緑色片岩（Chlorite green schist）が確認されている。弾性波速度は 3.0km/sec であった。掘削工法としては、底設導坑先進上部半断面工法が採用されているが、掘削時に切羽の自立が困難で、I期線施工時の最大変位量をおこした区間である。表-3.1に最大内空



D3-1

鋼製支保工	Mu-29	1.0mピッチ
ロックボルト	L=4.0m n=19本	@1.2m
金網	上下半	
吹付けコンクリート	20cm	
掘工コンクリート	30cm	

図-3.1 支保パターン図（I期線トンネル）

変位・天端沈下量を示す。

D3-1 区間では、吹付けコンクリートにクラックが発生したため上下半に増ボルトを打設するとともに、インパートコンクリートを打設後に変位が収束している。また、ボーリング調査時には、18~40 (1/min)、導坑施工時には、380~420 (1/min) もの集中湧水にみまわれている。表-3.2に施工記録や地山調査結果による代表的な周辺地山定数を示す。

表-3.1 最大内空変位・天端沈下量 (I 期線)

観測地点	上半内空変位	天端沈下
STA.30+84	76mm	44mm

3-2. II 期線施工状況

(1) 支保パターン

I 期線の施工記録や事前に実施した水平ボーリング結果から、F5' 断層破砕帯 (STA.31+64~STA.32+30) 区間では大きなゆみや変位が発生するおそれ大きく、掘削時の鏡の滑落、天端の崩落、ロックボルトの破断や吹付けコンクリートのひび割れなどの変状が発生する可能性が高いと考えられた。このため、この区間の施工にあたっては、当初から支保剛性を高めた基本支保パターン DII (S1)を採用するとともに、計測管理結果を支保パターンに早期に反映させることができる様に支保工・補助工法の選定フローと管理基準値を設定し、支保のランクアップ・ダウンの判定を行いながら施工を進めた。特に、計測結果及び地山状況を総合的に判断し、安定した切羽の状態が続く場合には、1段階毎の支保のランクダウンも行った。図-3.2に支保パターン図を示す。また、図-3.3に対策工選定図を示す。

表-3.2 施工記録や地山調査結果による地山定数

qu : 一軸圧縮強度 = 5~10N/mm²
 γ : 土の単位体積重量 = 29~30kN/m³
 C : 粘着力 = 0~0.01N/mm²
 ϕ' : 有効応力に基づくせん断抵抗角 = 20°
 E : 逆解析で得られた等価弾性係数 = 600,000kN/m²
 λ : 逆解析でえられた側圧係数 = 1.05

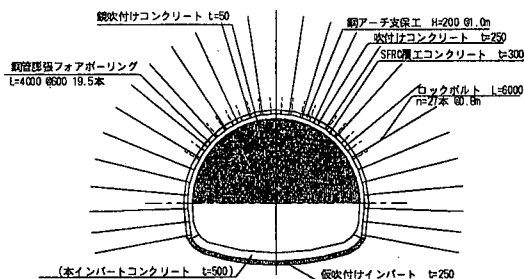
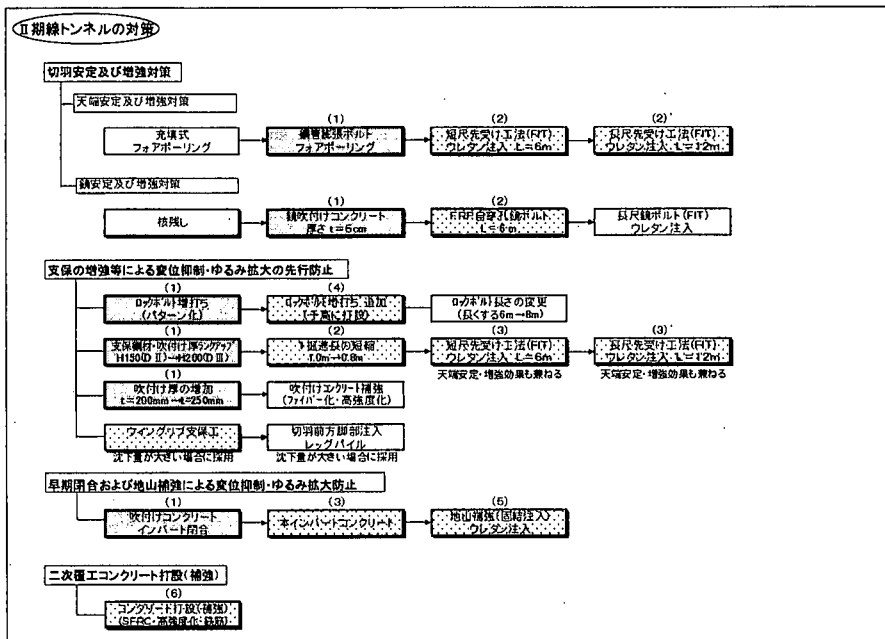


図-3.2 DII (S1) 支保パターン図



* この図の右側ほど、対策工のグレードが高くなる

□ : 施工開始時から採用する補助工法 (1) (段階的なグレードアップ・ダウン有り)

▨ : 計測管理結果に応じて段階的に採用していく予定の補助工法 (2)~(6)

図-3.3 F5' 断層破砕帯 対策工選定図

(2) 施工方法

掘削工法は、補助ベンチ付き全断面掘削工法を基本とし、早期閉合のため、切羽より7m程度の位置で吹付けコンクリートによる、インバート施工を行った。さらに、1週間に1度、切羽よりおよそ7m~17m間の本インバートコンクリート打設を行った。また、ロックボルトについても当初設計は6mボルト18本の設計であったが、9本の増ボルトをパターンボルトとして支保パターン化し当初より打設した。特に切羽の自立性の悪い所では、1掘進長を80cmとするDII(S2)パターンによる施工も行った。天端崩落にたいしては、鋼管膨張ボルトをフォアポーリングとして120°範囲に@60cmで打設した。また、切羽の安定に対しては、鏡吹付け($t=50\text{mm}$ 以上)で対処した。図-3.4に施工方法図を示す。今回の対策の結果、II期線施工時の最大内空変位量は62mm、天端沈下量は37mmに収めることができた。図-3.5に経時変化図を示す。図-3.6及び図-3.7に対策工選定フロー図を示す。なおDII(S2)支保パターン区間では、月進行40mであった。

(3) 切羽状況

F5'断層破碎帯部における切羽状況は、強破碎された御荷鉾緑色岩を主体とする破碎帯であった。また、走向・傾斜が非常に複雑であり、差し目と流れ目が交互に現れた。STA.31+80付近に入ってから、切羽全体が破碎土砂化しており、切羽は、全く自立せず、鏡吹付けを行っても破碎土砂が押し出される様な状況であったが、鋼管膨張ボルトによるフォアポーリングの効果により天端崩落には至らなかった。このような状況が、STA.32+00付近まで続いた。懸念された湧水については、ほとんど見られなかった。

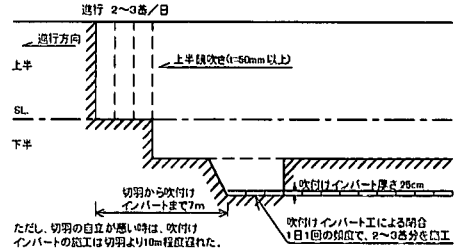


図-3.4 施工方法図

STA.31+89.5(II期線)

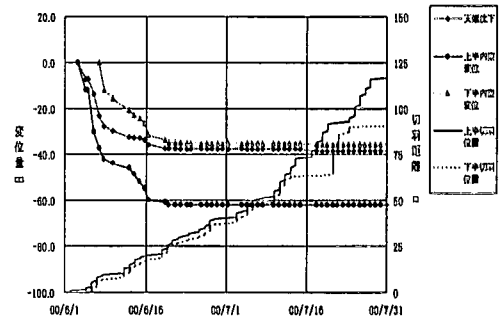


図-3.5 天端沈下・内空変位経時変化図

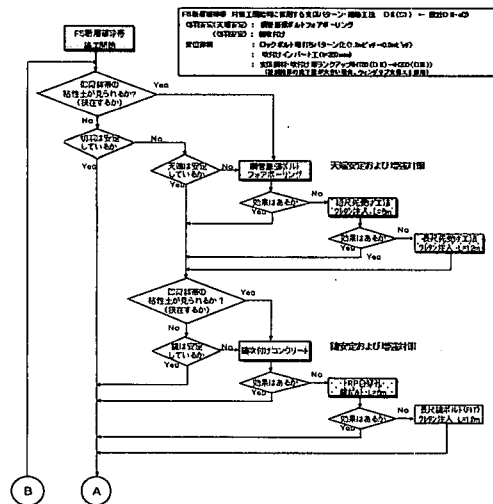


図-3.6 切羽安定及び増強対策工選定フロー図

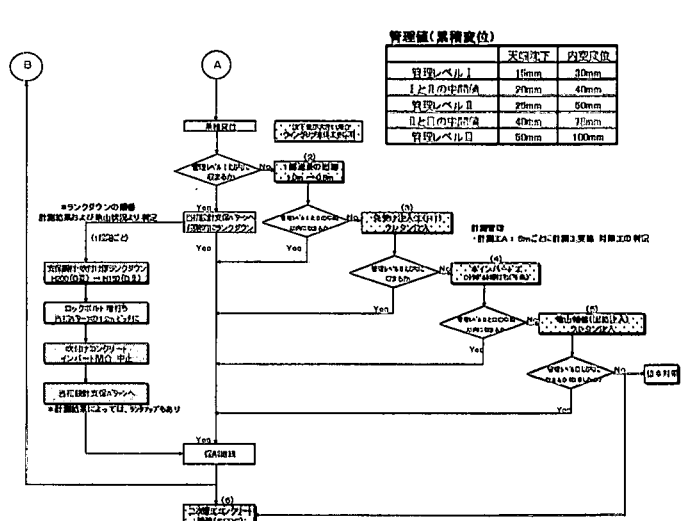


図-3.7 変位抑制とゆるみ拡大防止対策工選定フロー図

4. 計測工

4-1. I期線トンネルにおける計測概要

計測は、II期線トンネルの切羽の接近に伴うI期線トンネルへの影響を把握する為、I期線トンネルに事前に設置した。設置位置は、I期線トンネルの施工記録に基づき、双設トンネルの影響が特に大きく発生すると考えられる、地山条件が悪く、変位の大きかった断層破碎帯区間に設置した。計測項目としては、トンネル周辺の地山挙動を把握する為の地中変位測定、I期線トンネルの覆工コンクリートへの影響を把握する為の覆工応力測定を主体に実施した。この他、ロックボルト軸力計測、亀裂変位計測および内空変位・天端沈下計測も実施した。計測位置を図-4.1にまた断面方向の計測器の配置を、図-4.2に示す。

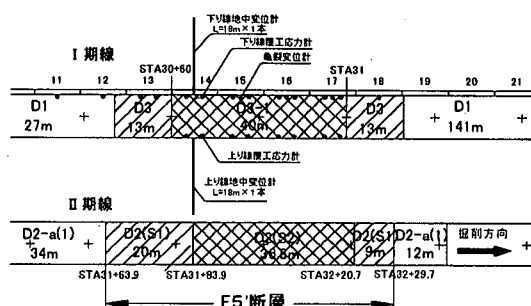


図-4.1 計測位置

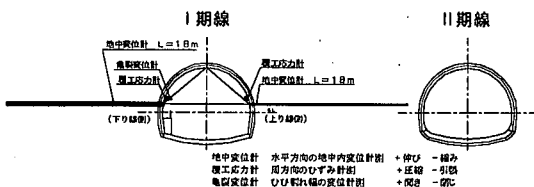


図-4.2 地中変位計配置図(断面方向)

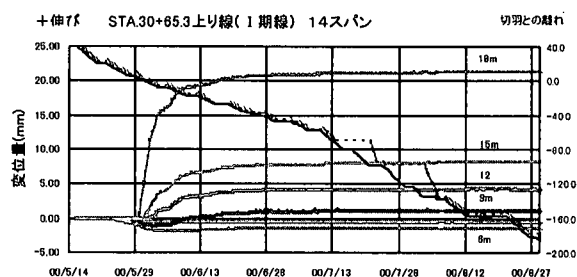


図-4.3 地中変位計 相対変位経日変化

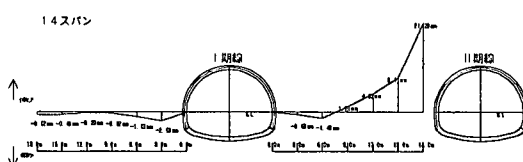


図-4.4 地中変位計 変位量分布図

(2) 覆工応力計

I期線トンネル覆工応力測定結果を図-4.5に示す。II期線トンネルが約5D程度近づいた頃から、圧縮側に増加傾向を示し始め、2D程度から急激に圧縮側に増加した。II期線切羽通過後、切羽が約2D程度離れた頃から収束傾向を示し、5D程度離れてから収束した。圧縮応力の増分は4MPa～6MPaであった。

(3) 内空変位・天端沈下

内空変位および天端沈下量ともに0～2mm程度であり、測定誤差等を考えれば、I期線トンネル覆工自体は、今回の計測地点では、動いていないといえる。

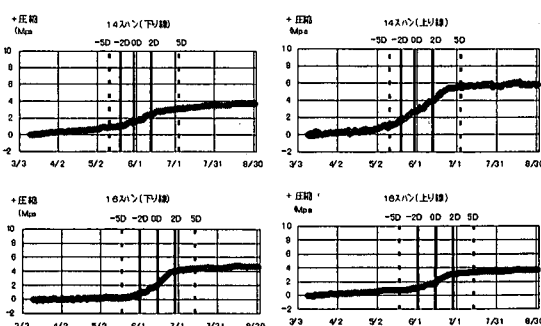


図-4.5 覆工応力計計測結果

4-3. 計測結果のまとめ

今回の計測結果から弱層部におけるⅡ期線トンネル施工によるⅠ期線トンネルに与える影響として以下のことが考えられる。

- ①Ⅱ期線トンネル掘削による影響は、Ⅱ期線切羽前方 5D 程度から発生し、2D 以降は顕著に現れ、切羽通過後 5D 程度までは、その影響があると考えられる。
- ②Ⅱ期線トンネル掘削によりⅠ期線トンネルに新たな荷重が発生し、その荷重は覆工の応力分布状態、地中内変位分布状態から推定すると、ほぼ左右同等となっており、Ⅰ期線トンネルに均等に荷重が作用していると考えられる。
- ③Ⅰ期線トンネルに新たに作用した荷重の大きさは、地中変位計から推定すると、壁面より 6 m 程度からであると考えられる。

これらの計測結果より、双設トンネルの挙動を見ると、一旦平衡状態に落ち着いていた先行トンネル周辺地山が、後行トンネルの掘削の影響で再度その平衡状態が乱され、それが先行トンネルに新たなトンネル荷重として作用するというメカニズムで双設トンネルの影響が現れてくるものと考えられる。

5. 双設トンネルの荷重発生メカニズムと考察

双設トンネルの影響については、これまで、弾性論の二孔円問題や F E M 等の数値解析を用いてトンネル周辺の応力分布変化が論じられていた。従来の解析結果であると、二孔円の場合、トンネル間の応力値が大きくなり、地山物性によっては破壊が内側に生じる。F E M 等数値解析の場合、後行トンネル（今回の場合Ⅱ期線トンネル）を掘削するシミュレーションにより、先行トンネルが後行トンネル側に引っ張られる形となる。先行トンネル周辺地山の変位は後行トンネル側の方が大きく、その結果、応力値の増分は内側が大きくなり、二孔円問題と同じ結果となる。このいずれの場合も、今回のⅠ期線トンネル周辺地山および覆工コンクリート応力の挙動を的確に全てを表しているとは言えない。先に述べたように、後行トンネルの掘削影響により、先行トンネル周辺地山の平衡状態が乱され、先行トンネルへの新たなトンネル荷重の発生につながっている。ここでは、計測結果に基づき、その大きさと分布を覆工の応力分布状態、あるいは、地中内変位分布から推定してみた。その結果、Ⅰ期線左右の覆工応力値の増分から考えると、ほぼ同等となっており、均等に荷重が作用している可能性が高い。一般に双設トンネルの影響解析を F E M により解析した場合、先行トンネル付近全体が後行トンネル側に引っ張られるような状態となる。しかしながら、今回の計測結果では、Ⅱ期線トンネルに近い地山は解析と同様な傾向を示したが、Ⅰ期線トンネル方向への動きや 6 m 付近に存在した変曲点は、解析では生じなかった。このため、今回の計測結果で得られた状態を解析で再現する為には、掘削相当外力以外に荷重 α をⅠ期線トンネル周辺に作用させる必要があった。

6. まとめと課題

双設トンネルは、これまでも数多くの施工例があるが、そのメカニズムについての検討は十分に行われていない。特に土被りが大きい地山での地中内の変位、応力状態の計測結果を基にした検討事例はほとんどない。

今回の事例は、Ⅱ期線トンネルの施工が、供用中のⅠ期線トンネルへ影響があることが懸念されたため、Ⅰ期線トンネルの覆工応力計測を行った。さらに、トンネル周辺の地山の挙動を調査するために、Ⅰ期線トンネルより地中変位計を設置した。計測結果より、Ⅱ期線トンネルの掘削がⅠ期線トンネル周辺の地山へ影響を与え、Ⅰ期線トンネルの応力状態が変化することが明らかになった。また、トンネル切羽の接近とともに、地山のひずみの状態が変化する様子を時系列で捉えることができた。今後の課題として、今回得られた計測結果をもとに、地山挙動の定量的な解明を試みるとともに、地山条件、トンネル形状等、それぞれの条件に応じた双設トンネルの設計・管理手法を確立していく必要がある。