

I 期線施工結果を活用した II 期線トンネルの合理的な支保設計

中川浩二¹・青木宏一²・進士正人³・廣井和也⁴・嵯峨正信⁵・岩井勝彦⁶

¹フェロ-会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²学生会員 修(工) 山口大学大学院 理工学研究科博士後期課程 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

³正会員 学博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁴正会員 修(工) 復建調査設計株式会社 交通技術部道路技術課 (〒732-0052 広島県広島市東区光町 2-10-11)

(元 山口大学大学院 理工学研究科博士前期課程)

⁵正会員 日本道路公団 四国支社 高松技術事務所 技術指導課 (〒760-0065 香川県高松市朝日町 4-1-3)

⁶正会員 Ph.D 財団法人高速道路技術センター 上席参与 (〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3-7-2)

II期線トンネルの支保設計を行うためには、双設トンネルとして建設される高速道路トンネルの特徴を生かす設計手法の開発が望まれている。しかし、これまでの事例をみると、I期線の施工データを一部活用し、II期線の設計・施工を実施した事例は数例みられるが、明確な設計手法として確立されたものはない。本研究では、蓄積された多くの双設トンネルの実施工データを比較し、独自の定量化を試みることで、より合理的なII期線トンネルの支保設計の考え方の検討をした。その結果、II期線トンネルの支保設計は、I期線トンネルの施工支保ランクを基本とするもの、若干軽めの支保規模を計画し、情報化施工を実施することにより合理的な施工が考えられることを示した。

Key Words : parallel tunnels, tunnel support pattern, face observation records, convergence measurements, informational procedure

1. はじめに

高速道路では、走行性や安全性、定時性の観点から、基本的に4車線道路以上のサービスレベルを確保することが望ましい。しかしながら、最近では第二東名・名神高速道路の建設を除き、2車線道路を暫定的に建設する形態が一般的であり、4車線を同時に開通させる形態は稀となっている。そのため多くの高速道路では、暫定的に1本の2車線道路トンネル(以下、I期線トンネルと呼ぶ)を対面通行させる2車線供用をした後、交通量の増加に合わせて、新たにもう1本の2車線道路トンネル(以下、II期線トンネルと呼ぶ)を建設し双設トンネルとする、いわゆる「4車線化工事」を行うのが現状である。

II期線トンネル工事は、道路平面線形の関係より、隣接するI期線トンネル供用下での施工となり、通常トンネル双方に影響がない中心間距離は30m程度とされている。したがって、地山状況が極めて厳しい場合や離隔を確保できない場合のII期線トンネルの設計は、それ自身の安定性確保だけではなく、I期線ト

ンネルへの影響も考慮に入れたものでなければならない。逆に離隔が十分に確保できる場合は、I期線を施工した経験を生かして、より合理的なII期線トンネルの設計・施工が可能となるはずである。しかし、これまで近接トンネルとしてのII期線設計では、I期線設計・施工データを一部活用した事例は数例見受けられるものの^{1),2)}、明確な方針が確立されているとは言い難い。

本研究では、蓄積された多くの双設トンネルの実施工データについて比較・定量化を試み、II期線トンネルのより合理的な支保設計のあり方についての検討を試みた。さらに、トンネル支保パターン決定における安全性をも考慮した上で、II期線トンネル支保工の合理的な設計手法に対する考え方を示した。

2. 双設トンネルの設計・施工と課題

(1) 双設トンネルの設計・施工の現状

双設トンネルの施工形態は、図-1に示すように(a)

同時施工型と(b)暫定施工型に大別される。

同時施工型は、2本のトンネルを同時期に設計・施工することを前提としている。実際の施工においては、どちらか1本のトンネルが先行施工され、他の1本のトンネルが数十m～数百m程度の切羽遅れをもって後続施工されることが多い。当然のことながら、設計段階においては、先行トンネルの施工結果が後続トンネルの設計に反映されることはない。また、施工段階においても先行トンネルの施工情報は、後続トンネルのそれに反映されるが、十分な検討が行われるまでには至らない。

一方、暫定施工型の場合は、1本のトンネル（I期線トンネル）を施工後、供用を開始し、しばらくの時間的経過のあと、他の1本のトンネル（II期線トンネル）を設計・施工するものである。そのため、II期線トンネルの設計にあたっては、I期線トンネルの施工データが存在し、これをもとに、より合理的な設計を行うことが考えられる。これまでの設計の試みとして以下のような事例がみられる。

- ① I期線や避難坑施工時の計測結果を用いた逆解析より、地山の変形係数を推定し、地山分類を見直し、II期線の支保設計を行った事例¹⁾。
- ② I期線の切羽状況、補助工法、維持管理状況および計測結果より、I期線の地山状況を点数化して再評価を行い、II期線の支保設計を行った事例²⁾。

しかし、これらの方法は、それぞれの事例において個々の成果をあげているが、必ずしもII期線トンネルの設計手法として定着しているとはいえない。I期線施工は、II期線からみれば「同様の地山状況に施工された実スケールの原位置試験」と位置づけることも可能であり、施工データの有効活用が望まれる。

(2) I・II期線の設計・施工支保パターンの比較・検討方法

先にも述べたように、I期線施工データを活用し、II期線トンネルの設計・施工を個々のトンネルで行った事例は、いくつか見受けられる。しかしながら、複数の双設トンネルを対象とし、かつ統一的な視点からの比較・検討による数量的な評価は、ほとんどなされていない。

そこで本研究では、II期線トンネルの施工に対して合理的な支保設計を行う基本概念の確立のために、双設トンネルにおけるI期線設計からII期線施工までの4つの段階で検討されている支保パターンの変化に着目した。ここでは、図-2に示す3つの観点から数量化を試み、I・II期線の設計・施工支保についての比較・検討を行った。

比較①：I・II期線の施工支保の一致状況の比較

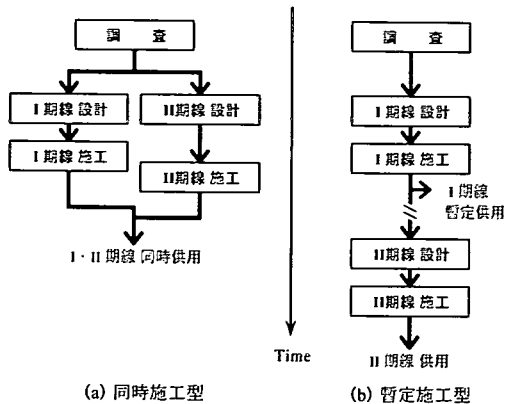


図-1 双設トンネルの施工形態

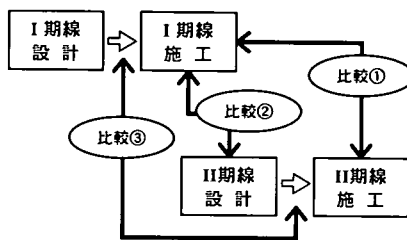


図-2 I・II期線の設計・施工支保の比較方法

I・II期線それぞれにおいて施工支保は、トンネル全体としてみたときに、どの程度合致するかを数量化し検討。

比較②：II期線支保設計へのI期線施工支保の採用状況

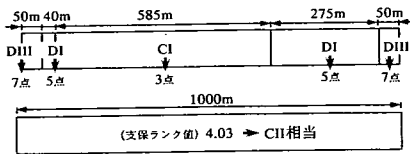
I期線施工支保データをII期線の設計支保として、どのように位置づけたかの検討。

比較③：I・II期線の設計支保に対する施工支保の一致状況の比較

I期線の設計と施工、II期線の設計と施工をそれぞれ比較することにより、I期線施工データを参考にすることが、II期線設計をどの程度施工実態に合った支保設計となったかの検討。

また、これらの検討にあたっては、「支保ランク値」と「支保一致率」という指標を新たに考案し、I期線とII期線、あるいは設計と施工支保の比較を行った。

ここで、「支保ランク値」とは、図-3に示すように各トンネルの平均的な支保ランクであり、支保パターンを一般部のA、B、CⅠ、CⅡ、DⅠ、DⅡおよび坑口部に採用されるDⅢの7段階に分類し、これらを1～7点と配点し、施工延長を考慮してトンネル全体の支保パターンの平均を求めた値である。なお、支保パターンの剛性比率については、赤木ら³⁾をはじめ経験的・理論的な手法が提案・検証がなされているが、現



<支保ランク値>

$$= \frac{1 \times L_A + 2 \times L_B + \dots + 7 \times L_D}{L}$$

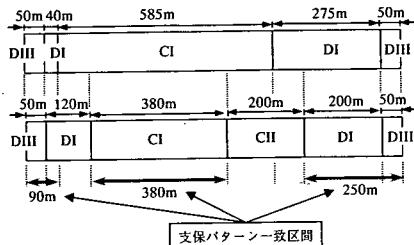
$$= \frac{3 \times 585 + 5 \times (40 + 275) + 7 \times (50 + 50)}{(50 + 40 + 585 + 275 + 50)}$$

$$= 4.03$$

L_A, L_B, \dots, L_D : 各支保パターンの施工延長

L : トンネル施工延長

図-3 支保ランク値の算出例



<支保一致率>

$$= \frac{\text{支保パターン一致区間長(m)}}{\text{トンネル施工延長(m)}}$$

$$= \frac{90 + 380 + 250}{1000} \times 100$$

$$= 72.0 (\%)$$

図-4 支保一致率の算出例

時点において確立された手法はないものとする。また、本研究ではI・II期線の支保パターンの比較を行うことから、均等に配点することで支保パターンの数値化を行った。

また、「支保一致率」とは、図-4に示すようにI期線・II期線あるいは設計・施工において、同じ施工区間と想定される位置におけるそれぞれの支保を比較し、7段階に分類した支保ランクが、一致した区間の総和のトンネル施工延長に対する割合である。なお、これらの図には具体例もあわせて示した。

(3) 検討対象トンネル

本研究では、日本道路公団（以下、JHと呼ぶ）が建設した双設型の高速道路トンネルのうち、暫定施工型の15組の双設トンネルを主な対象とした。表-1にその一覧を示す。また、本研究では、暫定施工型の双設トンネルの特徴をより明確にするため、表-2に示される同時施工型の6組の双設トンネルとの比較を併せて試みた。なお、暫定施工型と比較を容易にするため、同時施工型においても、先行トンネルをI期線ト

表-1 対象トンネル一覧（暫定施工型）

自動車道名称	トンネル名称	延長距離 (m)		主岩質
		I期線	II期線	
A自動車道	Aトンネル	1,324	1,307	砂岩, 頁岩
	Bトンネル	570	556	砂岩, 頁岩
	Cトンネル	644	628	砂岩, 頁岩
	Dトンネル	773	800	砂岩, 頁岩
B自動車道	Eトンネル	1,820	1,820	片麻岩
	Fトンネル	1,669	1,648	石英安山岩質凝灰岩
	Gトンネル	463	436	第三紀花崗閃緑岩
	Hトンネル	973	957	第三紀花崗閃緑岩
C自動車道	Iトンネル	2,211	2,305	凝灰岩
	Jトンネル	2,610	2,650	砂岩頁岩
E自動車道	Kトンネル	2,006	2,043	凝灰岩
	Lトンネル	683	676	凝灰岩
F自動車道	Mトンネル	477	476	黒色・緑色片岩
	Nトンネル	1,056	1,018	凝灰岩・凝灰角礫岩
	Oトンネル	2,311	2,299	凝灰岩

表-2 対象トンネル一覧（同時施工型）

自動車道名称	トンネル名称	延長距離 (m)		主岩質
		I期線	II期線	
G自動車道	Wトンネル (西工事)	1,470	1,471	黒色片岩
	(東工事)	730	726	黒色片岩, 砂質片岩
	Xトンネル	857	811	緑色片岩
	Yトンネル (西工事)	770	814	石英閃緑岩, 黒色片岩
	(東工事)	1,085	1,201	黒色片岩
	Zトンネル	1,582	1,582	黒色片岩, 砂質片岩

表-3 対象トンネル一覧（最近施工された事例）

自動車道名称	トンネル名称	延長距離 (m)		主岩質
		I期線	II期線	
H自動車道	aトンネル	1,375	1,071	花崗岩
	bトンネル	1,630	1,620 (768)	花崗岩
I自動車道	cトンネル	872	976 (612)	片岩
	dトンネル	3,722	3,714	片岩
	eトンネル	1,820	1,820	片岩
	fトンネル	1,375	1,378	片岩

※ ()内の数値は現段階での掘削長を表す

ンネル、後続トンネルをII期線トンネルと便宜上呼ぶこととする。

なお、表-1, 2で取り上げたトンネルの施工データは、いずれもJHの旧標準支保パターンにより設計・施工がなされたものである。これは、I・II期線の支

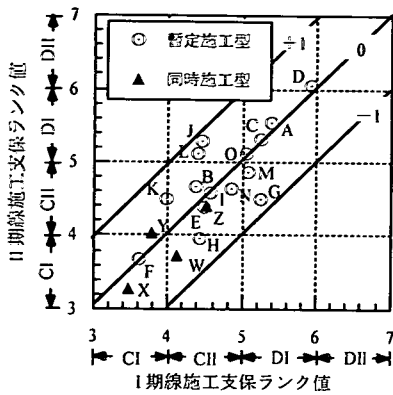


図-5 I・II期線の施工支保ランク値の比較
(図中の記号はトンネル名を表す)

保パターンの比較を容易にすること、ならびに当時はII期線施工によるI期線トンネルに与える影響が特に大きな課題として扱われず、I・II期線トンネルが独立な2本のトンネルとして掘削される傾向にあったと思われることを理由としている。

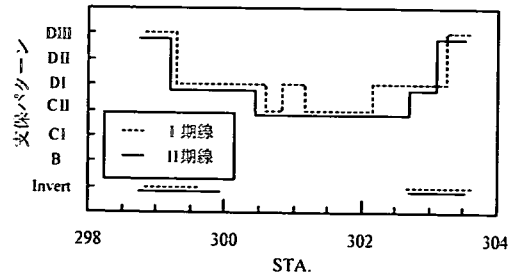
最近では、II期線トンネル施工例も増え、前述のようにいくつかの設計の試みやトンネル相互の影響に関する検討もみられる。そこで、最近の傾向についての検討を加えるべく、この2年間にII期線が施工されたトンネル(表-3参照)についても支保パターンの換算を行った上で検討した。

3. I・II期線における設計・施工支保の比較

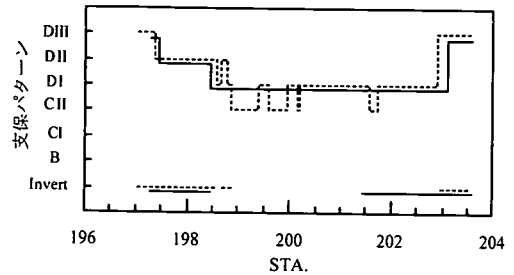
(1) I・II期線の施工支保の一致状況の比較(比較①)

I・II期線それぞれにおいて、施工時に採用された支保(以下、施工支保と呼ぶ)の相違について検討する。施工支保は、出現した地山に対し発注・受注者双方の技術者が慎重に決定するものであり、大局的にみて地山状況を忠実に表しているものと考えられる。

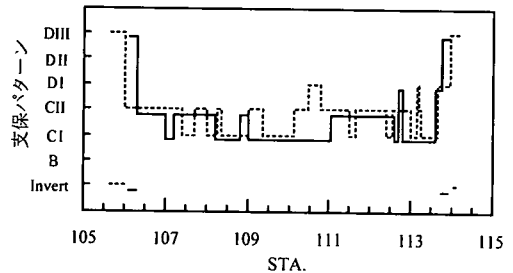
まず、トンネル全体の支保の重みを表す指標である支保ランク値により、I・II期線の比較結果を図-5に示す。暫定・同時の両施工型とも、I・II期線を比べると、1ランクを超えるような支保の差異はみられず、ほぼ同じ支保ランク値が得られている。I期線トンネルの供用中の変状が顕著となったトンネルと同一路線にあるJ、L、Kの3トンネルを除いて、II期線の支保ランクがI期線よりも重くなった事例はほとんどなく、一般に若干軽い側にシフトしているといえる。このことから、トンネル全体の支保規模としては、II期線ではI期線と比べて同等あるいは若干軽い支保規模を採用し、施工が行われていることがわかる。



(a) Mトンネル(暫定施工型)



(b) Cトンネル(暫定施工型)



(c) Xトンネル(同時施工型)

図-6 I・II期線の施工支保の採用状況の代表例

ここで、I・II期線の施工支保の採用状況の代表例として、暫定施工型MトンネルとCトンネル、同時施工型Xトンネルを図-6に示す。暫定・同時の両施工型とも、図-1に示すように双設トンネル建設における施工形態のフローが異なっているにもかかわらず、結果的にI・II期線両者の施工支保の差異は小さい。これらより、I・II期線それぞれの施工時におけるトンネルの支保選定は、よく似た地山条件下でなされていると考えられる。したがって、II期線設計時には、細部においては地形や地質の走向・傾斜の影響を考慮する必要があるが、基本的にはI・II期線の地山状況は同様と考えられ、I期線施工支保を参考にして支保設計を行っても大過はないものと思われる。

(2) II期線支保設計へのI期線施工支保の採用状況(比較②)

支保ランク値により、I期線施工支保とII期線設計支保を比較した結果を図-7に示す。図によると、前

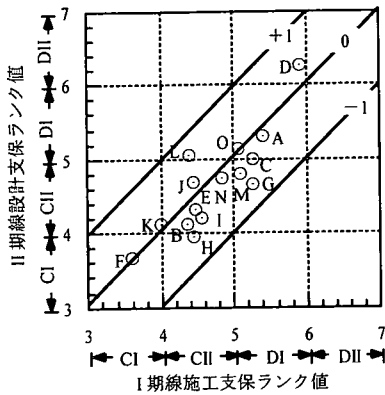


図-7 I期線施工支保とII期線設計支保の支保ランク値の比較
(図中の記号はトンネル名を表す)

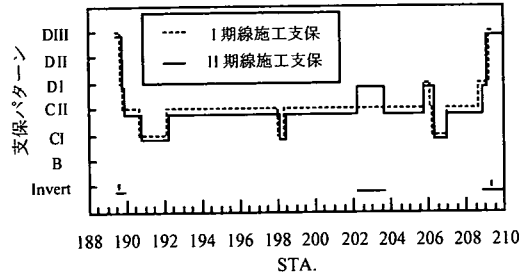
記のJ, L, Kトンネルと特に不良地山に建設されたDトンネルを除き、I期線施工支保に比べ、II期線設計の方が同等あるいは若干軽い支保剛性となっている。

ここで、I期線施工支保とII期線設計支保の比較を暫定施工型KトンネルとIトンネルを代表例として図-8に示す。Kトンネルは、I期線施工支保とII期線設計支保がトンネル全線にわたり、ほぼ一致している。また、Iトンネルは、図-7ではI期線施工支保・II期線設計支保とも支保ランク値はCII相当のトンネルである。I期線施工支保では部分的にDI区間がみられたが、II期線設計時ではDI区間はなくCIIを主体として支保設計がなされている。

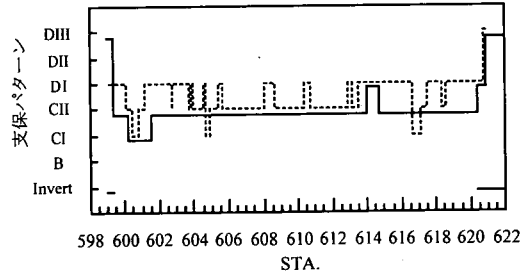
以上より、I期線の変状、あるいは不良地山への建設といった特殊な事例を除いて、一般にII期線トンネルの支保設計は、I期線トンネルの施工支保ランクを基本とし、若干軽めの支保規模を提案することで合理化を試みているといえる。

(3) I・II期線の設計支保に対する施工支保の一致状況の比較(比較③)

I・II期線それぞれの設計支保と施工支保の支保一致率の比較を行った結果を図-9に示す。暫定施工型は、Nトンネルを除き、ほとんどのトンネルでI期線よりもII期線の方が、設計と施工の支保規模が一致した区間が多くなっている。また、II期線の支保一致率は、I期線の支保一致率に関わらず、約60%以上(Nトンネルを含む)となっている。これは、地山に適合した支保が選定されたと考えられるI期線施工支保を参考として、II期線トンネルの支保設計が行われたため、I期線よりもII期線の設計支保と施工支保の一致した区間が増加したものであろう。



(a) Kトンネル(暫定施工型)



(b) Iトンネル(暫定施工型)

図-8 I期線施工支保とII期線設計支保の採用状況の代表例

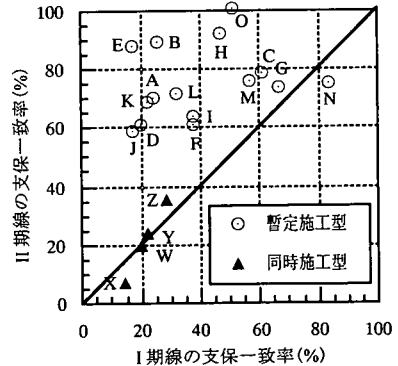
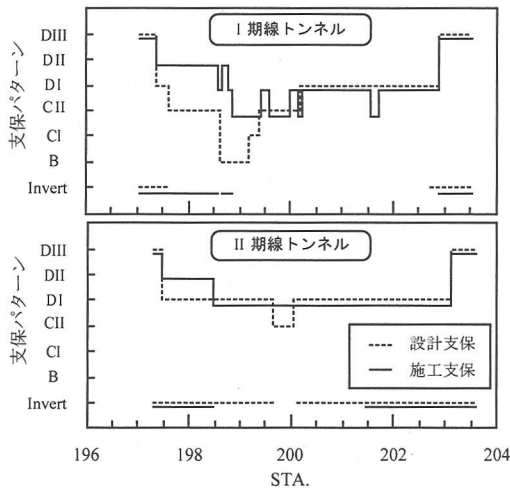


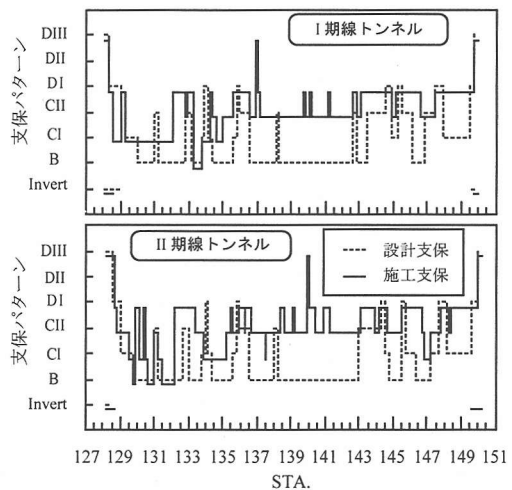
図-9 設計支保と施工支保の一致率
(図中の記号はトンネル名を表す)

一方、図-9より同時施工型は、暫定施工型のようなI期線からII期線にかけて支保一致率の向上はみられず、I・II期線とも設計支保と施工支保の支保一致率は、ほぼ同等であるとともに、それぞれの支保一致率は低いことがわかる。これは、同時施工型では、暫定施工型とは異なり、I・II期線の設計をI期線施工前の事前地質調査に基づいて同時に行っているためである。

ここで、I・II期線の設計支保・施工支保の採用状況の代表例として、暫定施工型Cトンネル、同時施工型Wトンネルを図-10に示す。暫定施工型のCトンネルは、I期線施工時に設計支保から1ランクを超え



(a) Cトンネル(暫定施工型)



(b) Wトンネル(同時施工型)

図-10 I・II期線の設計・施工支保の採用状況の代表例

る支保変更がなされた区間がみられるが、II期線施工時には、そのような大きな支保変更がなされた区間はみられない。なお、支保一致率が向上した他のトンネル事例においても、Cトンネルと同様に支保の変更は軽微であった。

一方、同時施工型のWトンネルでは、設計支保と施工支保の関係は、I・II期線とも同様であり、暫定施工型のようなII期線施工時における支保一致率の向上はみられないのは当然である。

次に、暫定施工型の15組の双設トンネルに着目し、設計から施工にかけての支保の変更状況を図-11に示す。I期線では設計から施工にかけて、最大3ランクの支保変更を行った事例のほか、1~2ランクの支保変更も多くみられるのに対し、II期線ではほとんど支保変更は行われておらず、たとえ支保変更が行われたとしても、その変更幅はほぼ1ランク程度と小さいものであることがわかる。したがって、I期線の施工支保を参考に行われたII期線の設計支保は、概ね妥当であるといえよう。

以上より、I期線施工データをII期線の支保設計時に活用できる暫定施工型は、I期線よりもII期線で設計支保と施工支保の支保一致率が向上したが、同時施工型ではこのような傾向は認められなかった。したがって、双設トンネルにおいて単にII期線トンネルの設計精度の向上という観点からみれば、暫定施工型のような施工形態の方が有利であると考えられる。また、同時施工型においても暫定施工型のように、先行トンネルの施工データが反映された後続トンネルの支保設計を検討する有効性が明らかとなった。

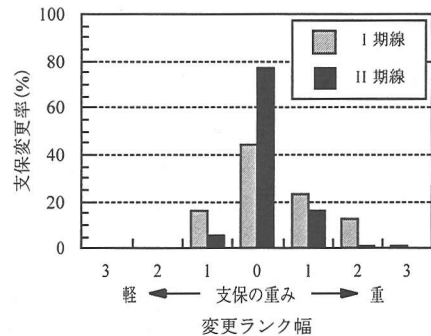


図-11 設計から施工にかけての支保変更率 (暫定施工型)

4. 地山状況からみたI・II期線施工支保の評価

I・II期線の施工支保の比較を行った結果、ほぼ同等の支保が採用されており、I・II期線トンネルの地山状況は、基本的に同じものであると推測される。

この点について、I期線施工データの切羽観察結果・計測結果より検証を行う。

(1) 切羽観察記録による地山状況の把握

対象トンネルの切羽観察に用いられた旧切羽観察表(表-4参照)は、支保選定のための定性的な指標としての意味合いが強かった。そこで本研究においては、中田ら⁴⁾が新しい切羽評価システムの提案をする上で総合的な岩盤強度に対する評価項目として挙げている「圧縮強度」、「風化変質」、「割れ目の頻度」、「割れ目の状態」に着目し、4項目それぞれの評価点を単純加算した値を新たに「岩盤強度評価点」と定義

表-4 旧切羽観察表の一部⁵⁾

項目	評価内容	評価点と評価基準			
		1	2	3	4
A	切羽の形状	安定	鏡面が岩塊から抜け落ちる	鏡面の押し出しを生じる	鏡面は自立せず崩れあるいは流出
B	素掘面の状態	自立(管諾不要)	時間がたつとゆるみ抜け落ちる(後管諾)	自立困難掘削後早期に支保する(先管諾)	掘削面に先行して山を受けておく必要がある
C	圧縮強度	$\sigma_c \geq 1000 \text{ kg/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	$1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	$200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	$50 > \sigma_c$ ハンマー刃先くい込む
D	風化質	なし・健全	岩目に沿って変色、強度やや低下	全体に変色、強度相当に低下	土砂状、粘土状、崩砕、当初より未固結
E	割れ目の頻度	間隔 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目なし	$1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	$20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	$5\text{cm} > d$ 破裂、当初より未固結
F	割れ目の状態	密着	部分的に開口	開口	粘土はさむ、当初より未固結
G	割れ目の形態	ランダム方形 XX	柱状 	層状、片状、板状 	土砂状、細片状、当初より未固結
H	湧水	なし、滲れ程度	滴水程度	集中湧水	全面湧水
I	水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	崩壊、流出

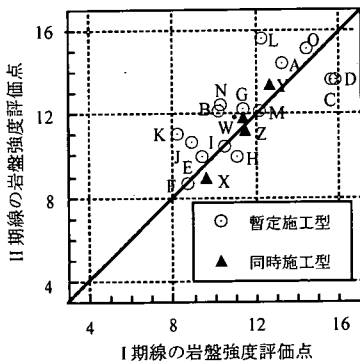
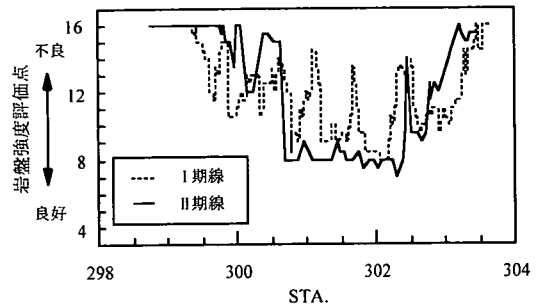


図-12 岩盤強度評価点の平均値の比較
(図中の記号はトンネル名を表す)

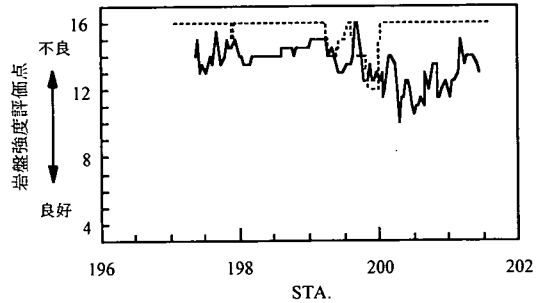
し、これを尺度としてI・II期線の比較を試みた。すなわち、ここでいう岩盤強度評価点とは、旧切羽観察表のC～F項目の評価点の総和である。

各トンネルにおけるI・II期線の岩盤強度評価点の平均値の比較を図-12に示す。同時施工型は、ほとんど対称線上にあり、そのばらつきも小さいことから、I・II期線の地山状況は同等であると考えられる。一方、暫定施工型は、対称線の周囲に分布し、全体的にはII期線の大きい側へいくらかシフトがみられるものの、ほぼI・II期線で同程度といえる。このことは、図-5に示すI・II期線とも地山状況は同程度であると推測された施工支保ランク値の結果と一致する。しかし、ばらつきは同時施工型に比べて大きい。

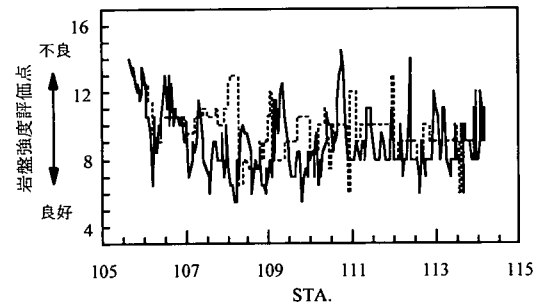
ここで、岩盤強度評価点の推移状況の例として、暫定施工型MトンネルとCトンネル、同時施工型Xト



(a) Mトンネル(暫定施工型)



(b) Cトンネル(暫定施工型)



(c) Xトンネル(同時施工型)

図-13 岩盤強度評価点の推移状況

ンネルを図-13に示す。図-13(a)のMトンネルでは、I・II期線で部分的に大きく異なる評価がなされているところもあるが、全体としては、ほぼ同等の地山評価が行われているといえる。なお、このトンネルは図-12に示す岩盤強度評価点の平均値、および図-5に示す施工支保ランク値によるI・II期線の比較結果より、I・II期線ではほぼ同等な値が得られたと考えられる事例である。このことは、図-13(c)のXトンネルをはじめとする同時施工型ではより顕著である。

一方、図-13(b)のCトンネルは、I期線ではほとんどの区間において切羽評価4項目すべてが最悪の4点と評価され、岩盤強度評価点は最大値の16点となっている。しかし、II期線でその値は、10～16点と大きく変化している。このトンネルは、図-5のI・II期線の施工支保ランク値が、ほぼ同等な値が得られて

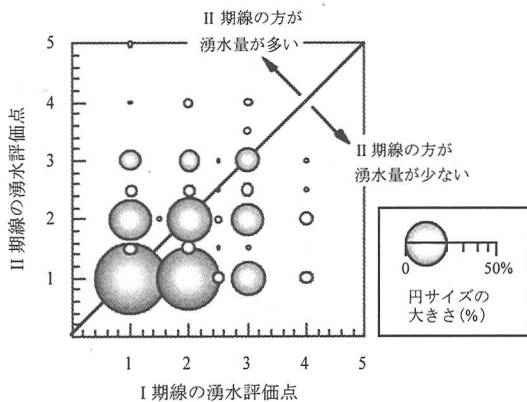


図-14 切羽観察の湧水に関する項目の
I・II期線の分布比較

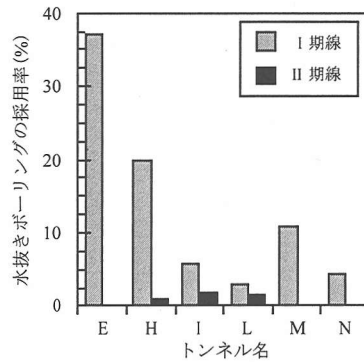


図-15 水抜きボーリングの採用状況

いるにもかかわらず、図-12の岩盤強度評価点の平均値ではI・II期線の地山評価が大きく異なる結果となっている事例である。

このように、岩盤強度評価点を指標としたI・II期線の地山評価は、同時施工型では4トンネル全てで同等の地山条件であるとの結果が得られたのに対し、暫定施工型では同等の地山状況との結果が得られた事例もあるが、部分的あるいはトンネル全線にわたり、その評価が大きく異なるものも多く見受けられる。

これは、切羽観察の評価に観察者の個人依存性があり、そのため同じ切羽の観察を行っても個人差が生じる可能性があることに起因するもの⁹⁾と考えられる。そのため、I・II期線の施工がほぼ同時期であり、切羽観察記録者・監督者が同一である可能性が高い同時施工型では、I・II期線の地山評価は比較的良好一致している。しかし、暫定施工型ではI・II期線の施工時期が異なり、かつ記録者・監督者がI・II期線で異なることから、I・II期線の施工支保ランクより地山状況は同じであると推測されたトンネルにおいても、I・II期線の地山評価が異なっており、切羽観察法の定量化の一つの問題点といえよう。

(2) I期線トンネルによる水抜き効果

一般にII期線施工の際には、I期線トンネルによる水抜き効果が期待されていることが多い。水抜き効果がみられる場合、I期線に比べII期線施工時には、切羽観察の「湧水」項目は良好側へ推移し、また補助工法の「水抜きボーリング」は減少する傾向にあると考えられる。そこで、これらに着目し、I期線による水抜き効果について検証する。

切羽観察の「湧水」項目について、I・II期線で比較を行い、全15トンネルについて、その分布状況を百

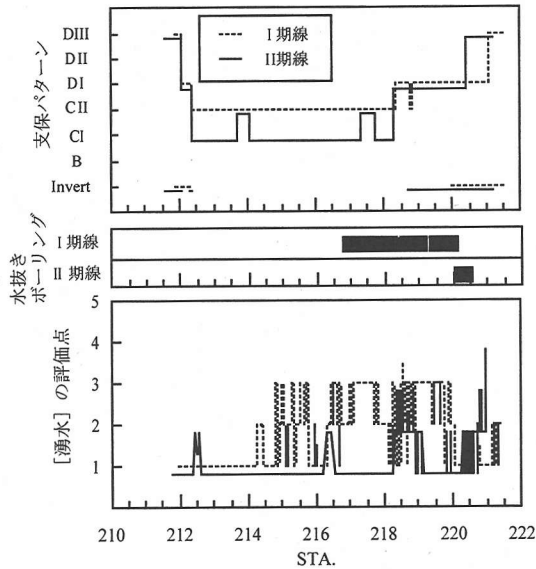
分率で表したものを図-14に示す。なお、円サイズは全15トンネルの総切羽観察データ数に対する各評価点相当切羽数の分布を表す。I期線の方がII期線に比べ、評価点が明らかに高い方に分布していることがわかる。

次にI期線施工時において、水抜きボーリングが実施された6トンネルについて、I・II期線で水抜きボーリングの施工区間のトンネル延長に対する割合の比較結果を図-15に示す。I期線施工で水抜きボーリングの行われた全てのトンネルで、II期線施工時には、I期線施工時に比べ水抜きボーリングを実施した割合が極端に少なくなっていることがわかる。

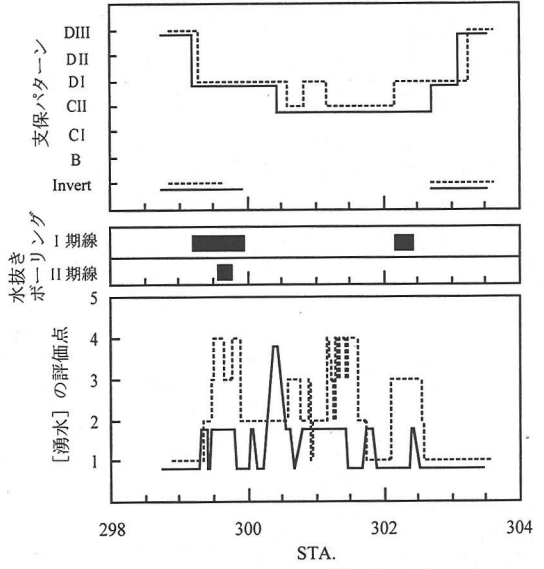
ここで、I期線施工時において水抜きボーリングが実施されたHトンネルとMトンネルを例にとり、I・II期線の施工支保と切羽観察の「湧水」項目との関係を図-16に示す。両トンネルとも、切羽観察の「湧水」項目は、全体的にI期線に比べII期線の方が評価点は低くなっている。特に、水抜きボーリングがI期線では実施されたがII期線では実施されなかった区間においては、その傾向が顕著である。以上より、II期線施工時には、I期線施工による顕著な水抜き効果が伺える。

次に、このI期線施工による水抜き効果が、II期線の支保設計に及ぼす影響について検討する。

現在、JHの新切羽観察様式では、図-17に示すように、支保選定の妥当性の目安として、切羽評価点を用いて検証を行えるようになっている⁶⁾。図-17の指標を用い、I期線による水抜き効果、特に切羽観察「湧水」の評価点が下がることを想定して、II期線設計を行った場合、湧水調整点によりII期線設計支保はI期線施工支保よりも軽い側へ支保変更を行った方が妥当であるとの結果が得られる可能性がある。しかし、図-16に示すように、I期線による水抜き効果がみら



(a) H トンネル(暫定施工型)



(b) M トンネル(暫定施工型)

図-16 施工支保と切羽観察の湧水の項目と水抜きボーリングの採用位置の関係

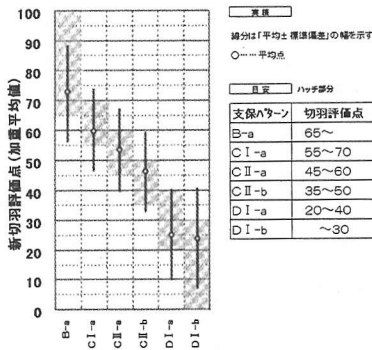
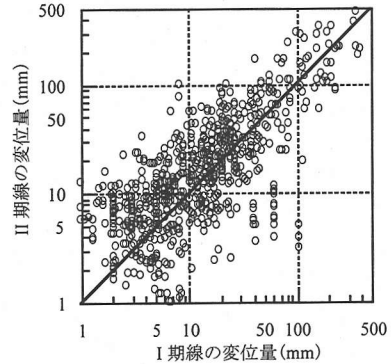
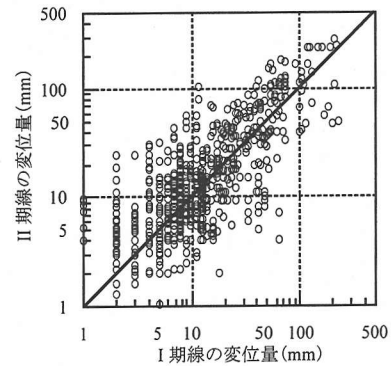


図-17 新切羽評価点と支保選定の実績と目安



(a) 内空変位



(b) 天端沈下

図-18 内空変位・天端沈下の比較

れた区間において、I・II期線の施工支保に差異はあまりみられない。

したがって、I期線による水抜き効果は、II期線の支保がI期線よりも支保ランクが軽くなるほどではなく、切羽の自立性が良くなるとともに、それらに関連する補助工法が減少する程度に留まるものであると考えられる。

(3) 変位の発生状況

切羽観察とともに、施工時の安全性や当初設計の妥当性の検証のために行われている内空変位・天端沈下から、I・II期線の比較を行った。

暫定施工型15トンネルのうち、計測結果が入ってきた11トンネルのI・II期線トンネルの内空変位および天端沈下の比較を図-18に示す。内空変位および天

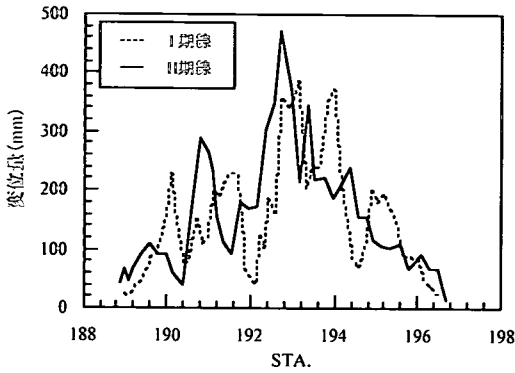


図-19 I期線施工時に大変位が生じた事例(Dトンネル)のI・II期線の内空変位の比較

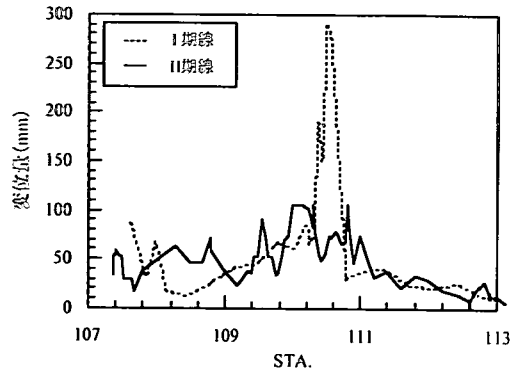


図-20 大変位区間について事前に検討が行われた事例(fトンネル)のI・II期線の内空変位の比較

端沈下とも、I・II期線で発生する変位のオーダーは、ほぼ同程度であり、双設トンネルは、ほぼ同等の地山状況であることがここでも示される。言い換えれば、II期線施工時にもI期線で発生した変位量とほぼ同様な変位が生じる可能性があるといえる。

また、I期線施工時において100mmを越えるような大きな変位が生じた区間で、II期線施工時においても再び大変位を生じさせている事例がいくつかみられる。その一例を図-19に示す。このようにII期線施工時に大変位を生じることは、トンネル中心間距離が30m程度あるとはいえ、II期線トンネルそのものの安定性ばかりでなく、暫定供用下にあるI期線トンネルへの影響を及ぼす可能性も考えられる。

そこで、II期線設計・施工時にI期線の変位結果の資料が存在し、大変位区間については事前に変位抑制の検討が行われたfトンネルのI・II期線の内空変位の比較を図-20に示す。I期線施工時に200mm近い変位を生じた箇所は、II期線施工時には100mm程度までに変位が抑制されている。他の100mm未満の箇所については、I・II期線で、ほぼ同等の変位が生じていることがわかる。このことは、I期線において大変位が発生した区間でのII期線施工において同等な施工を行えば、I期線と同程度の変位が発生するが、変位抑制に対する検討と対策を十分行えば、II期線の変位抑制が可能となることを示しているといえよう。

このことより、II期線設計時においては、I期線施工支保や切羽観察記録だけでなく、I期線計測結果を設計に反映すべきであることがわかった。つまり、I期線施工時に大きな変位が生じた箇所については、II期線設計では、変位を抑制するような対策工を事前に検討し準備することが肝要である。但し、その対策工と変位抑制の効果については、今後データを蓄積し検討を進めていく必要がある。

表-5 新旧標準支保パターンの支保耐力

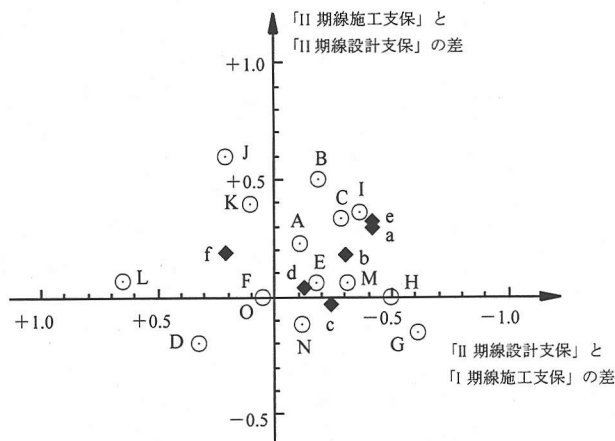
旧標準支保パターン		新標準支保パターン	
支保パターン	支保剛性の比率	支保パターン	支保剛性の比率
B	1.00	B-a	0.98
CI	1.99	CI-a	1.95
		CI-a	2.02
CII	2.52	CII-b2	2.52
DI	3.84	DI-a	3.76
		DI-b	3.84
DII	5.14	DII-a	5.14
DIII	7.00	DIII-a	7.00

※ 支保剛性の比率は旧標準支保Bパターンを1とした

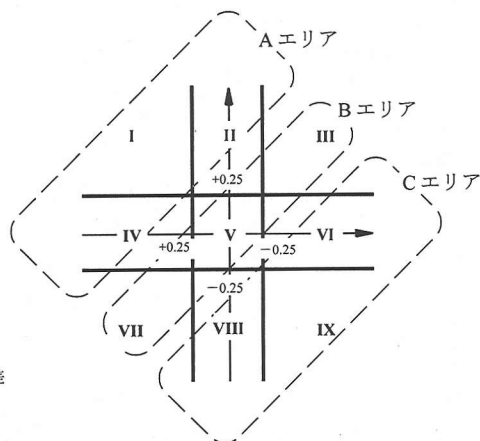
5. 合理的なII期線支保設計への考察

これまで述べてきたように、II期線トンネルの支保設計の基本的な考え方としては、I・II期線の地山状況は大きくは変わらないとされることから、原則としてI期線施工支保と同等の支保規模を採用するのが望ましいといえる。

次に、より合理的なII期線の支保設計を考えるために、I期線施工支保からII期線施工支保までの流れに合わせて3つの段階の支保ランク値の推移について検討を行う。検討を行うにあたり、西日本地域において最近施工されたII期線トンネル例(6トンネル:表-3参照)では、新標準支保パターン²⁾により施工が行われている。それに対し、I期線の支保パターンは旧標準支保パターンを採用しているため、I・II期線の支保ランクの対応を検討するためには、新標準支保パターンを旧支保パターンに換算する必要がある。支保ランクの換算にあたっては、赤木ら^{3),4)}の考え方を基本に行い、赤木らの推奨する手法に従って求め



(a) II期線の設計支保と施工支保の関係
(図中の記号はトンネル名を表す)



(b) グループ分け

Group I	Group II	Group III
例：なし ① ② ③ 3 4 5 6	例：K トンネル ① ② ③ 3 4 5 6	例：I トンネル ① ② ③ 3 4 5 6
Group IV	Group V	Group VI
例：L トンネル ① ② ③ 3 4 5 6	例：O トンネル ① ② ③ 3 4 5 6	例：H トンネル ① ② ③ 3 4 5 6
Group VII	Group VIII	Group IX
例：なし ① ② ③ 3 4 5 6	例：なし ① ② ③ 3 4 5 6	例：なし ① ② ③ 3 4 5 6

縦軸：① I期線施工支保 ② II期線設計支保 ③ II期線施工支保
横軸：支保ランク値

(c) 各グループの代表例

図-21 I期線施工支保からII期線施工支保にかけての支保ランク値の変化

た新旧標準支保パターンの対応表(表-5参照)を作成した。なお、支保剛性の比率は、旧標準支保Bパターンを1とした場合のものである。

図-21(a)は、横軸にI期線施工支保とII期線設計支保の支保ランク値の差をとり、プラスになるほどII期線設計支保が、I期線施工支保よりも重くなっている(II期線設計支保はI期線施工支保より重く設計され

た)ことを、縦軸にII期線設計支保とII期線施工支保の支保ランク値の差をとり、プラスになるほどII期線施工支保が、II期線設計支保よりも重くなっている(II期線施工支保はII期線設計支保より重く設計された)ことを表した図である。なお、図-21(a)中の○印は表-1のトンネルに対応し、◆印は表-3のトンネルに対応するものである。

また、図-21(a)を図-21(b)に示すようなGroup I～IXの9つのカテゴリーに分類した。なお、各グループの区分は、目安として支保ランク値の差が±0.25以内ものを「同程度の支保ランク値である」と判断している。

各グループの代表的な例を図-21(c)に示す。この図の第1, 2, 3行は、それぞれII期線設計支保に対してII期線施工支保が「重くなる」・「同等」・「軽くなる」ものとなる。また、第1, 2, 3列は、I期線施工支保に対してII期線設計支保が「重くなる」・「同等」・「軽くなる」ものとなる。

図-21(a)によると、前述したD, Lトンネルを例外として、一般にII期線の設計支保はI期線の施工支保より軽めに、またII期線の施工支保は設計支保より重めになっているようである。

図-21(c)からみて、I期線施工・II期線設計・II期線施工の順に支保ランク値が重くなるGroup IとII期線設計よりII期線施工支保が軽くなるGroup VII～IXに当てはまる事例はみられなかった。

ここで、図-21(b)に示すようにGroup I～IXをそれぞれAエリア(Group I・II・IV)、Bエリア(Group III・V・VII)、Cエリア(Group VI・VIII・IX)と再度グループ化して、以下に考察を加える。

① I期線施工支保に比べてII期線施工支保ランク値が重くなるケース (Aエリア対応)

支保ランク値の重くなる時期は、II期線設計時(Group IV)、施工時(Group II)と異なる。しかし、いずれの場合も供用中のI期線の変状などの発生、あるいはII期線施工によるI期線トンネルへの影響が懸念され、II期線設計・施工支保が重くなったものである。問題提起がなされた時期が、II期線設計前であるとGroup IVとなり、設計後であるとGroup IIに分かれるものであろう。なお、先にも述べたように、II期線設計段階でランク値を重くしたものが施工時にさらに重くされるという事例(Group I)はみられなかった。

② 最終的にI期線施工支保とII期線施工支保の支保ランク値が同等となるケース (Bエリア対応)

Group IIIは、I期線の施工結果から地山状況が把握できているという判断の下、II期線の設計支保を軽くしたものであるが、II期線施工時において、I期線と同程度の支保が必要であると判断されたものである。これと比べてGroup Vは、I期線施工支保に準じてII期線支保設計がなされ、またそのレベルでII期線施工が行われたものである。なお、Group VIIの事例は得られていない。

③ I期線施工支保に比べてII期線施工支保ランク値が軽くなるケース (Cエリア対応)

Group VIはGroup IIIと同様な理由から、支保ランクの軽減を試み、結果的に成功したものであるといえよう。また、Group VIII・IXの事例はみられなかった。

ここで、Group VII～IXの事例がみられなかったことから、地山状況が大きく予想と異なることの少ないII期線施工においては、あえて設計支保ランクより施工支保ランクが軽減される事例は少ないと考えられる。換言すれば、現場において安全性の確保が全てに優先されるのは言うまでもない。そのため、微妙な段階において設計支保より危険側を施工支保として選択するのは、現実的には容易ではないといえる。

このことから、支保ランクの軽減を合理化と考えるならば、合理的な範囲でII期線の設計支保は軽めに設定し、現場で必要に応じて支保規模を見直す方法が望ましいものといえる。言い換えれば、I期線の施工データを入手することで、より精度の高い情報化施工をII期線設計・施工では、実施できる可能性があることがわかる。すなわちGroup III・VIは、その試みがなされた事例であり、今後この考え方に基づく支保設計の合理化が期待される。この意味では、Group Vには支保軽減の可能性が有り得たとも考えられる。

6. おわりに

本研究では、I期線トンネル施工時における設計・施工結果を、II期線トンネルに反映させる合理的な支保設計法を確立するために、これまでの双設トンネルの実施工データを比較・定量化することにより、II期線トンネルの支保設計のあり方についての検討を試みた。また、施工現場の実態にも配慮した上で、トンネル支保工に影響を及ぼす因子を整理し、II期線トンネル支保工の合理的な設計を行うための考え方を提案した。

I期線トンネルの施工は、II期線トンネルの設計・施工からみて「実物大実験」であるとの観点に立てば、I期線施工結果を利用したII期線トンネルの更なる合理化手法の検討が今後望まれる。

謝辞:本研究を行うにあたり、貴重な施工データを御提供頂きました日本道路公団四国支社、同高松技術事務所、ならびに四国道路エンジニア株式会社の各機関の方々には心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 田名瀬寛之, 斉藤宏, 上原希四郎: 供用線近接の避難坑拡幅によるII期線施工, 北陸自動車道市振トンネル, トンネルと地下, 第29巻3号, pp.15-23, 1989.3.
- 2) 高知自動車道明神トンネル詳細設計報告書, 1996.2.
- 3) 赤木渉, 佐野理, 進士正人, 西塚郎, 中川浩二: 山岳トンネル施工支援のための切羽観察法の適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.121-134, 2001.9.
- 4) 中田雅博, 三谷浩二, 八木弘, 西塚郎, 西村和夫, 中川浩二: 観察記録の分析に基づく新しいトンネル切羽評価システムの提案, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.131-141, 1999.6.
- 5) 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説
- 6) 八木弘, 三谷浩二, 赤木渉: 新しい切羽評価手法について, 第23回日本道路会議, pp.200-201, 1999.
- 7) 吉塚守, 三谷浩二, 中田雅博: トンネル支保のマルチ化に関する検討, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.34, pp.105-122, 1997.11.
- 8) 赤木渉, 西塚郎, 進士正人, 佐野理, 中川浩二: アンケートによる技術者の支保剛性に関する評価について, トンネル工学研究論文・報告集, 第10巻, pp.145-148, 2000.11.

(2002.3.5 受付)

A RATIONAL DESIGN OF TUNNEL SUPPORT OF THE 2ND STAGE TUNNEL BASED ON THE 1ST STAGE TUNNEL CONSTRUCTION RECORDS

Koji NAKAGAWA, Koichi AOKI, Masato SHINJI, Kazuya HIROI
Masanobu SAGA and Katsuhiko IWAI

In order to perform a rational tunnel design at second tunnel of parallel tunnels, it is strongly required to improve a tunnel design methodology. The case study of the parallel tunnels shows that this methodology has not yet been established. This paper deals with the rational tunnel design methodology of the second tunnel based on the first tunnel construction data by comparison each tunnel of the parallel tunnel construction data. An application of the methodology shows that the lighter support scale may be used for the second tunnel by carrying out the informational procedure to perform the realization of the rational tunnel construction.