

大断面トンネルの支保軽減に関する考察

Study of tunnel support reduction for large scale tunnel

城間博通*・伊藤哲男**・関茂和***

Hiromichi SHIROMA, Tetsuo ITO, Shigekazu SEKI

In order to construct expressways efficiently and reduce the construction cost, we adopted the high standard tunnel support member (shotcrete, rock bolts, steel arch supports and concrete lining) on the New Tomei, Meishin expressways.

JH(Japan Highway Public Corporation) categorized tunnel support into 4 patterns(B, C I, C II and D I). However, for the purpose of reducing construction cost and selecting tunnel support patterns flexibility, we subdivided the tunnel support patterns and carried out the test construction.

In this research, we study the standardization of tunnel support reduction pattern on this basis of the test construction results and the analysis including reverse analysis, a discontinuous analysis and the other various analysis using tunnel support stress data and the other measurement results.

KeyWords: tunnel, large scale tunnel, tunnel support, tunnel support reduction pattern

1. はじめに

現在供用中の東名・名神高速道路は、昭和 44 年の全線開通以来関東・中京・関西を結ぶ基幹的国土軸として、我が国の産業・経済の発展に多大な貢献を果たしてきた。しかしながら、沿線地域での人口及び産業の集中による交通量の増大、老朽化や車両の大型化などによる維持補修工事の定常化などにより、高速道路の本来の機能である高速性と定常性が十分確保されていない状況にある。このような状況を鑑み、第二東名・名神高速道路は、現在の東名・名神高速道路と一体となって、また防災機能の面からも三大都市圏の連携を強化し、全国的ネットワーク形成の根幹となるべき重要な役割を果たす道路として計画された。第二東名・名神高速道路は、21 世紀の我が国の基幹をなす路線であり、将来においても十分なゆとりを有し、高速走行可能な道路として、片側 3 車線の全路肩を確保した計画となっている。現在、建設中の第二東名・名神高速道路の大断面トンネルは、施行命令を受けているものでは、本坑の上下線別で 142 本(183 km)である。また、この中で、TBM 導坑を事前に施工するものは、32 本(75 km)である。これらの内、平成 15 年 4 月時点の掘削進捗は、本坑で 54 本に着手し 30.5%、TBM 導坑では 21 本に着手し 65.7%となっている。

* 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室

** 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室

*** 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室

第二東名・名神高速道路の大断面トンネルに適用する J H 設計要領は、平成 13 年 1 月に制定され、清水第三トンネルや静岡第二トンネル等の試験施工結果から安全で合理的な「標準支保パターン」が示されている。しかし現段階では、地山等級(B、C I、C II、D I)に応じた 4 つの支保パターンが掘削工法別に示されており、(2 車線断面のトンネルにおいては 6 パターンあることから)必要な支保量に対し、余裕のある設計となるケースが考えられ、その改善のため標準支保パターンの細分化が求められる。また、同要領には、設計の修正の考え方(支保の増減方向の指標)が示されるものの、それらを支保パターン化して表すまでには至っていない。

そこで、地山状況に応じた合理的、経済的な支保パターンを選択できるように、新しく標準支保パターンを追加する必要があると考え、支保の軽減化案について提案するとともに、確認のため現地トンネルでの試験施工を開始した。本報文では、第二東名・名神トンネルの支保の軽減検討について、その経緯と現地で行われた試験施工の結果を報告するものである。

2. 現行の支保パターン

J H 設計要領(第二東名・名神高速道路 H13. 1)に示されている標準支保パターンは、表-1 のとおりである。また、図-1 に標準支保パターン図を示す。

トンネルの一般部において、表-1 に示す 2 つの掘削工法が基本とされ、それぞれ 4 つの標準支保パターンが設定されている。各支保部材については、従来 2 車線で使用している支保部材に対して、耐力や強度を高めた材料を用い、支保工の軽量化や薄肉化を図っている。

表-1 第二東名・名神トンネルの標準支保パターン

掘削工法	地山等級	支保パターン	掘進長(m)	ロックボルト(厚さモルタル)				吹付け厚さ(cm)	鋼アーチ支保工	
				長さ(m)	耐力(kN)	周方向(m)	延長方向(m)		上半サイズ	下半サイズ
TBM導坑先進工法	B	B	2.5	上下半 4	170 4	3.0	2.5(1.25) 千鳥配置	3.8	10(上半のみSFSC)	—
	C I	C I	2.0	上下半 4	290 4	1.5	2.0	2.9	15(上半のみSFSC)	—
	C II	C II	1.5	上下半 4	290 4	1.2	1.5	1.8	15	HH-154
	D I	D I	1.2	上下半 6	290 6	1.2	1.2	1.4	20	HH-154
上半先進工法	B	B	2.0	上下半 4	170 4	2.0	2.0	3.8	10(上半のみSFSC)	—
	C I	C I	1.5	上下半 4	290 4	2.0	1.5	2.9	15	HH-154
	C II	C II	1.2	上下半 4	290 4	1.6	1.2	1.8	15	HH-154
	D I	D I	1.0	上下半 6	290 6	1.5	1.0	1.4	20	HH-154

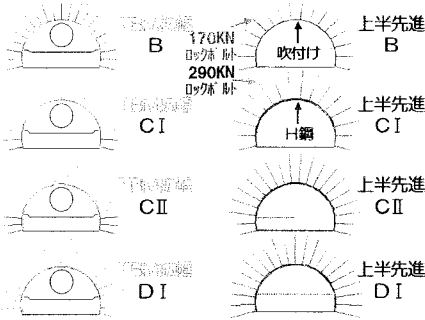


図-1 標準支保パターン図

ロックボルトの充てん材は早強モルタルを採用する
ロックボルトの 290kN は、計測結果により 170kN にすることができる
吹付けコンクリートの一軸圧縮強度：10N/mm²(材齢 1 日) 36N/mm²(材齢 28 日)
HH-154(高規格鋼アーチ支保工)：SS540 の仕様を基に引張強さ 590N/mm² 以上にし、
破断破断伸び率 17% 以上

3. 支保軽減の考え方

支保の軽減化を検討するうえで、第二東名・名神トンネルが、2 車線トンネルの支保軽減の検討時¹⁾と異なる点は、「大断面」かつ「扁平」であることから、更なる安全面での注意が必要であるとともに、施工実績数が圧倒的に少ないという点である。そのため、2 車線トンネルでの検討時のように、実績データを分析することにより支保軽減化の案を提示する手法は、現実的ではない。しかし、①「手探りではなく、2 車線トンネルでの検討過程や結果を参考とする」、また、前述のように②「新技術の導入による新しい規格の支保材料を採用した

表-2 第二東名・名神トンネルの支保の軽減方法

	支保の軽減化の案	軽減化しない項目
吹付けコンクリート	・厚さの減(5cm ずつ)	・設計圧縮強度の減
ロックボルト	・周方向ピッチを広げる ・短尺のものを採用する	・引抜き耐力の減(一部採用) ・打設範囲を狭める
鋼アーチ支保工	・下半のものを削除する	・従来規格鋼の採用 ・SFSC への変更
一掘進長	・延進	

ことから、現地での従来規格のものとの併用は、段取替えの観点でなるべく避ける」ことを基本とすると、第二東名・名神トンネルの支保の増減は、ある程度その幅が限られることとなり、表-2に示すとおりとなる。なお、ここでは幅のある地山等級の中で、標準支保パターンが余裕のある設計となるケースを改善するという目的から、支保の増強ではなく、軽減ということに限定して実施することとした。

4. 支保軽減案と試験施工

各標準支保パターンに表-2に示した軽減方法を適用し設定した支保の軽減案を表-3に示す。軽減案については、FEM等の数値解析手法により、支保の軽減化の可能性について、確認するとともに、概算のコスト削減額も算出し、支保の軽減化による安全性、施工性及び経済性を整理し、現地の地山状況を考慮し、着色部の支保の試験施工を実施した。

試験施工では、原則としてそれぞれ30m以上の標準支保区間と支保軽減区間とを設けた。また、現地状況を考慮しながら、相互の支保による干渉影響を防ぐため、両区間の間に20~30mの距離を設けた。また、両区間内のそれぞれ中央付近で計測工A、Bを実施し、変形と各部材の発生応力等を把握することとした。(図-2)

表-3 掘削工法、標準支保パターン別の支保軽減案及び試験施工

	吹付けコンクリート	一掘進長	鋼アーチ支保工	ロックボルト [掘方向に]*	ロックボルト [高さと耐力]
TBM掘削	厚さ15⇒10cm (ともに上半のみ (SFSC)) TBM①	20⇒22m 1.29⇒52m ² /本		15⇒20m 1.29⇒3.8m ² /本	上半の長さ15⇒4m 耐力290⇒170KN TBM①の終盤(上下)、赤松(上)
			下半⇒上半	12⇒15m 1.18⇒2.2m ² /本	上半の長さ6⇒4m 耐力290⇒170KN TBM①
	厚さ20⇒15cm TBM②:終盤(下)	12⇒15m 1.14⇒1.8m ² /本		12⇒15m 1.14⇒1.7m ² /本	下半の長さ6⇒4m TBM①
上半先通				20⇒25m 1.29⇒3.5m ² /本 上半①	上半の長さ6⇒4m 耐力290⇒170KN 上半①
			下半⇒上半	15⇒20m 1.18⇒2.3m ² /本 上半②:掘削第二(下)	上半の長さ6⇒4m 耐力290⇒170KN 上半②:掘削第二(下)
	厚さ20⇒15cm 上半①	10⇒12m 1.14⇒1.7m ² /本		15⇒18m 1.14⇒1.6m ² /本	下半の長さ6⇒4m 上半①

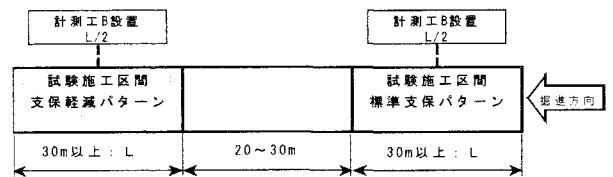


図-2 試験施工区間割

5. 試験施工結果

表-3の5支保パターンを3トンネルで試験施工を行った結果、ほとんどの実施事例において、トンネルの安定性を損うような変位量、応力等の発生は無く、問題の無い結果が得られた(表-4)。

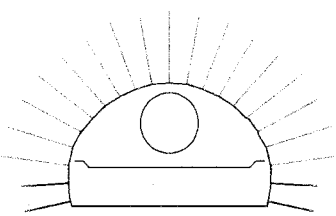
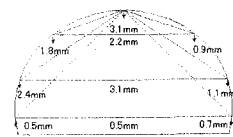
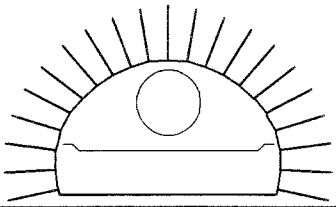
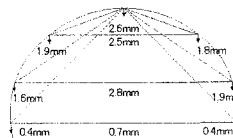
表-4 試験施工計測結果

工法	支保パターン	軽減支保パターン	TN名	比較支保	岩石名	掘進長	切羽状態	計測工A(管理レベル)	計測工B(管理レベル)	計測工C(管理レベル)
TBM掘削 掘削方向 掘削方向	TBM① ロックボルト掘削方向 掘削方向 掘削方向	TBM① ロックボルト掘削方向 掘削方向 掘削方向	終盤(下)	標準	砂岩	52m	7.4~11.2	2.1~2.4	0.1~0.2	1.4~1.5
				支保軽減	砂岩	62m	11.3	7.3	-0.2~1.0	1.4~1.5
				標準	花崗岩	225m	2.5~5.6	1.1~4.0	0.5~1.5	1.4~1.5
				支保軽減	花崗岩	240m	0.1~2.4	1.0~3.0	-0.7~1.5	1.4~1.5
				標準	石灰岩	125m	2.6~3.6	2.6~3.6	0.2~1.8	1.4~1.5
				支保軽減	石灰岩	125m	2.3~3.1	2.6~3.4	-0.6~0.6	1.4~1.5
	TBM② ロックボルト掘削方向 掘削方向 掘削方向	TBM② ロックボルト掘削方向 掘削方向 掘削方向	終盤(上)	標準	砂岩	80m	7.4~11.3	2.1~2.4	0.1~0.2	1.4~1.5
				支保軽減	砂岩	80m	11.3	7.3	-0.1~0.4	1.4~1.5
				標準	花崗岩	225m	2.5~5.6	1.1~4.0	0.5~1.5	1.4~1.5
				支保軽減	花崗岩	225m	0.1~2.4	1.0~3.0	-0.7~1.5	1.4~1.5
				標準	石灰岩	125m	2.6~3.6	2.6~3.6	0.2~1.8	1.4~1.5
				支保軽減	石灰岩	125m	2.3~3.1	2.6~3.4	-0.6~0.6	1.4~1.5
上半先通掘削工法	上半① 掘削方向 掘削方向 掘削方向	上半① 掘削方向 掘削方向 掘削方向	掘削二(下)	標準	花崗岩	162m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				支保軽減	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				標準	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				支保軽減	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				標準	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				支保軽減	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
	上半② 掘削方向 掘削方向 掘削方向	上半② 掘削方向 掘削方向 掘削方向	掘削二(下)	標準	花崗岩	162m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				支保軽減	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				標準	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				支保軽減	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				標準	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5
				支保軽減	花崗岩	125m	1.2~1.3	0.6~0.8	0.1~0.2	1.4~1.5

※管理レベル値は、各地山等級に応じた限界ひずみより算出したもの

表—5に試験施工データの代表例として、浜松トンネルにおける標準支保パターンと支保軽減パターンTBM④（ロックボルトの低耐力・短尺化）との変位量の比較を示す。なお、標準区間と支保軽減区間の「J」H新切羽観察手法²⁾による切羽評価点は同等であり、ほぼ同等の地山条件であった。

表—5 標準パターンと支保軽減パターンの変位比較（浜松トンネル）

	支保パターン図	変位
標準C I		土被り149m切羽評価点60.52(59~62)
		 天端沈下 2.6~3.6mm 上半水平 2.9~3.5mm
TBM④		土被り135m切羽評価点59.85(56~62.75)
		 天端沈下 2.3~3.1mm 上半水平 2.8~3.4mm
	ロックボルト短尺化 6m(290kN)→4m(170kN)	

この結果を見ると、変位計測では天端沈下量、内空変位量ともに小さく、支保軽減しても変位量はほぼ同等であった。また、支保部材に発生した応力は、ロックボルトの一部に局所的に大きな値はあるものの、吹付けコンクリート、ロックボルトともに管理レベルⅠ以下と小さく、支保部材の耐力に対して問題ないということがわかる。

また、今回の試験施工においては計測工から得られたデータをもとに支保部材である吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼アーチ支保工が受けている荷重を内圧に換算し、それぞれの支保部材について負担率を算出し、標準支保パターンと支保軽減パターンを比較した（図—3）。負担率の算定にあたっては、各支保部材の受け一掘進長あたりの平均軸力を算出し、全体を100とし、各支保部材の負担率を算出するものである。各支保部材の内圧は、

- ・吹付けコンクリート＝吹付けコンクリートの平均軸力／（周長×掘進長）
- ・ロックボルト＝ロックボルトの平均軸力／（ロックボルト打設間隔×掘進長）
- ・鋼アーチ支保工＝鋼アーチ支保工の平均軸力／（周長×掘進長）

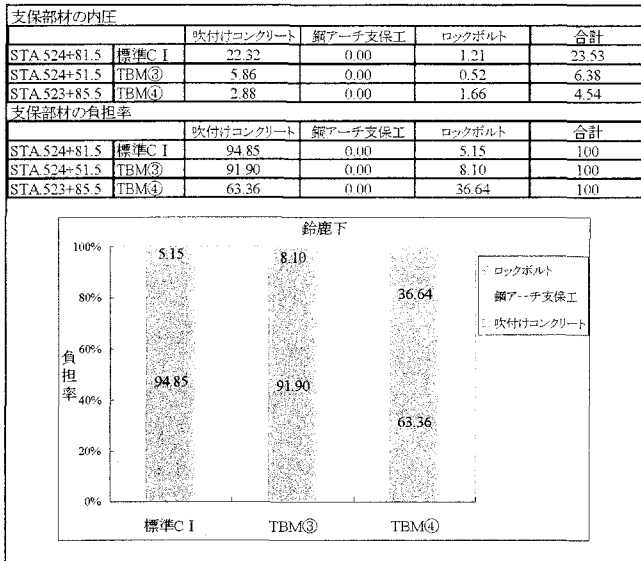
とし、あくまでトンネル内空方向への応力が作用した内圧の比較を行うため、吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工の引張値、及びロックボルトの圧縮値は0とする。

試験施工区間では切羽状況が標準支保パターンと支保軽減パターンで大きく異なっているケースがあるため、比較としてはあくまで切羽状況が同様なもの（切羽評価点が同等程度）とした。鈴鹿トンネル下り線の標準C Iパターンと支保軽減パターンTBM③、TBM④の支保負担率の比較を行うと、下記の点が明確となった。

①標準支保パターンとTBM③との比較では、支保軽減としてロックボルトの周方向ピッチを1.5mから2.0mに変更したが、支保負担率は標準支保パターンとほぼ同程度である。したがって、ロックボルトの周方向ピッチを0.5m程度に変更しても、支保負担率は大きく変わらない。

②標準支保パターンとTBM④との比較では、ロックボルトの長さ及び耐力を6m（290kN）から4m（170kN）に短尺・低耐力化すると、ロックボルトの負担率が増加しているが、耐力的には問題がない。

図-3 支保負担率（鈴鹿トンネル下り線CⅠ）



③今回の試験施工で言えることは、吹付けコンクリートの負担比率が大きく、全体支保に対し依存性が大きい。

6. 評価・検証

5. 試験施工結果で得られた内空変位、地中変位計測の計測値等をもとに、FEM逆解析によるトンネル周辺地山のひずみの推定による評価にて、支保軽減パターンの妥当性及び安全性について評価を行った。

標準支保パターンと支保軽減パターンでの比較を行い、総括すると下記の点が明確となった（表-6）。

①CⅠ及びCⅡでは、標準と支保軽減パターンによる差異はみられず、各パターンとも地山の

ひずみは小さく、また、限界ひずみと比べてもかなり小さい。

②DⅠでは、標準・支保軽減パターンともCⅠ及びCⅡと比べて地山のひずみは大きい。標準支保パターンにおいてロックボルトの打設範囲内でのひずみは、限界ひずみの1/2程度である。支保軽減パターンは標準と比較して、切羽評価点も低く地山状態が悪いものと考えられ、ひずみ領域が大きい。

以下に標準支保パターンと差異の見られなかったCⅠと差異の見られたDⅠのひずみ領域図を示す（図-4、図-5）。

表-6 逆解析によるひずみ領域の推定

掘削工法	支保パターン	軽減支保パターン	TN名	比較支保	逆解析結果		
					地山弾性係数 1,000～5,000 (2,000)	限界ひずみ $\log_e = -0.25 \log E - 1.22$	ひずみ分布
TBM 導坑先進掘削工法	CⅠ	TBM③ ロックボルト周方向打設間隔拡大 1.5m→2.0m	鈴鹿 (下)	標準	1,600	0.0095	0.003以上3m
				軽減支保	1,750	0.0093	0.003以上6m
			鈴鹿 (上)	標準	7,500	0.0065	0.003以上2m
				軽減支保	14,000	0.0055	0.003以上0m
		TBM④ ロックボルト短尺化 6m(290kN)→4m(170kN)	浜松 (上)	標準	6,200	0.0068	0.003以上2m
				軽減支保	6,000	0.0068	0.003以上1.5m
			鈴鹿 (下)	標準	1,600	0.0095	0.003以上3m
				軽減支保	1,500	0.0097	0.003以上12m 0.005以上1.5m
	DⅠ	TBM⑤ 吹付けコンクリート厚減 20cm→15cm	鈴鹿 (上)	標準	7,500	0.0065	0.003以上2m
				軽減支保	27,000	0.0047	0.003以上0m
上半先進掘削工法	CⅡ				地山弾性係数 200～2,000 (500)	限界ひずみ $\log_e = -0.25 \log E - 1.22$	ひずみ分布
					地山弾性係数 500～5,000 (1,000)	限界ひずみ $\log_e = -0.25 \log E - 1.22$	ひずみ分布
					地山弾性係数 500～5,000 (1,000)	限界ひずみ $\log_e = -0.25 \log E - 1.22$	ひずみ分布

※なお、表に示す限界ひずみは櫻井らの「都市トンネルにおけるNATM」によるもの

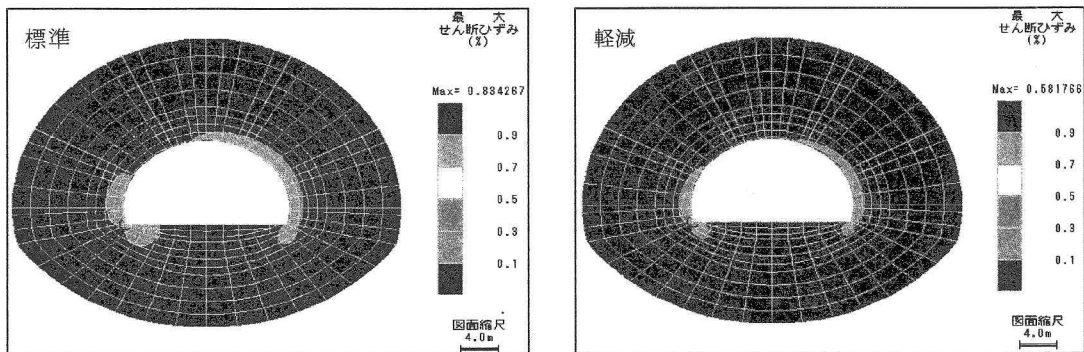


図-4 標準C Iと軽減パターン (TBM④) の逆解析での周辺ひずみ比較 (浜松トンネル)

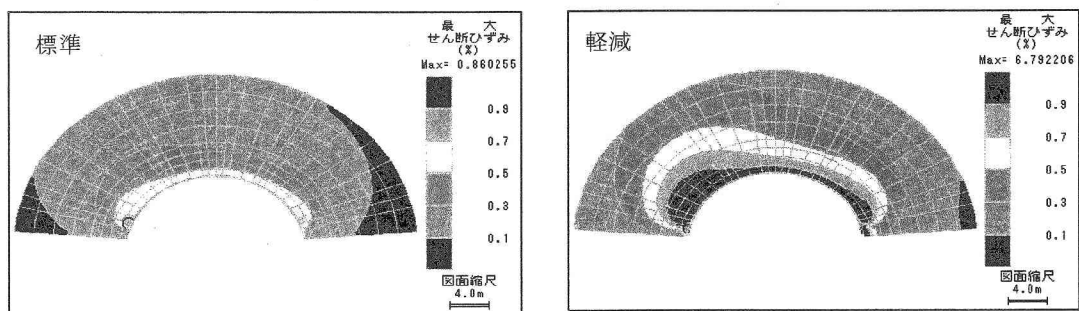


図-5 標準D Iと軽減パターン (TBM⑧) の逆解析での周辺ひずみ比較 (鈴鹿トンネル)

7. まとめ

第二東名・名神高速道路の大断面トンネルにおける支保の軽減について、現地トンネルでの試験施工を行い、計測結果の評価、解析的検討評価から、以下の知見を得ることができた。

- ①天端沈下量と内空変位量は、今回の試験施工のC I、C IIパターンと同等の支保量・地山条件であれば、標準支保パターンと支保軽減パターンを比較しても大差がない。
- ②今回の試験施工において、6mのロックボルトの周方向ピッチの拡大(2.0mまで)とロックボルト長の低耐力・短尺化(4m:170KN)のいずれも地山及び支保構造は安定しており、支保軽減の可能性はある。
- ③評価・検討の目安として計測結果から算出した支保負担率の検討から、吹付けコンクリートの負担率が高いため、薄肉化を行う際には、支保が高い応力状態の場合構造が不安定化する可能性があり、注意が必要である。

このように現地での試験施工結果及び解析検討を行った結果、一部のパターンを除いて軽減支保パターンの適用の見出せた。しかしながら、今回の試験施工は、限られたパターン及び地質という条件のもとでの結果であり、今後標準支保パターン化するにあたっては、①適用する地山に関する条件などの課題整理、②支保軽減とコスト縮減額との関係を整理、③今回は連続体として検討を行ったが、C I、C II級地山における不連続岩盤に関する岩塊挙動検討をした上で、標準支保パターンへの追加及び軽減手法の本格導入を図りたいと考える。

8. 参考文献

- 1) 中野,中田,三谷:トンネル支保のマルチ化に関する研究,日本道路公団試験研究所報告,vol33, pp.102-113,1996
- 2) 赤木,三谷,城間:新しい切羽評価点法の適用に関する検討,日本道路公団試験研究所報告,vol36, pp.86-103,1999