

大断面トンネルの支保パターン選定 のための現場実験

吉塚 守¹・三谷浩二²・田中 一³・吉武 勇⁴・中川浩二⁵

¹正会員 日本道路公団 九州支社 保全部保全第一課 (〒810-0001 福岡県福岡市中央区 1-4-2)

²正会員 博(工) 日本道路公団 四国支社 高松工事事務所 (〒761-8084 香川県高松市一宮町 1040-1)

³正会員 日本道路公団 本社 技術部 道路技術課 (〒100-8979 東京都千代田区霞ヶ関 3-3-2)

⁴正会員 博(工) 山口大学講師 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁵正会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

本研究は、大断面トンネルにおける設計・施工の合理化に向けた基礎資料を得ることを目的としたものである。特に、大断面トンネル施工の支保パターンの選定に関連し、いくつかの支保材料・支保パターンを用いた現場実験を行い、その支保効果の観察・評価を試みた。本稿は、出来るだけ経済性・施工性に優れた支保パターンを選定しようとする模索過程において、得られた計測結果および知見をとりまとめたものである。最終的には、高耐力ロックボルトと鋼纖維補強高強度吹付けコンクリートを併用した支保パターンとすることで、一掘進長 2.0m に延伸しても安全な施工が可能であることを示した。

Key Words : large scale tunnel, support system, steel fiber reinforced shotcrete, high strength rock bolt, field test

1. はじめに

日本道路公団(以下、JH と記す)が建設する第二東名・名神高速道路のトンネルは車道部総幅員 15m、掘削幅が約 19m、掘削断面積が約 200m² におよぶ。これを従来の二車線トンネルと比べると、掘削幅で約 2 倍、掘削断面積が 2.5 倍に相当する大断面トンネルである。

このような大断面の地下構造物としては、地下発電所や石油備蓄基地等があるが、これらは比較的地山条件のよい場所に選定して建設されることが多く、(支保構造・形状は異なるものの)道路トンネルのように線状構造物として、複雑な地形・地質条件下で数 km にわたり施工された事例は、国内外で皆無に等しい。したがって、広範に及ぶ大断面トンネルの支保構造の実証的比較・検討報告は見受けられない。

このため、断面形状、掘削工法、支保構造および建設後の長期安定性など技術的に数多くの検討課題を有し、従来の延長線上の工法・材料を使用して施工した場合には、必ずしも効率的で経済的なものとなる確証が得られなかった。

このような背景から、JH では本格的な建設工事に先立ち、これら技術的な課題や不明な点の究明と、建設費の縮減あるいは新材料・新工法の試行などを目的とし、実際の大断面トンネルにおける試験施工

による検証が必要不可欠との判断から、試験施工工事を実施することとした¹⁾。

試験施工工事は、本格的な建設工事の指標を得ることと施工実績を積むことを主眼に、事業全体の進捗度や工事規模(延長)、さらにはトンネルの立地条件(地形・地質・土被り)等を勘案し、静岡県内の清水第三トンネルを選定した。

この試験施工工事では、比較的良好な地山をフィールドとするものであり、新材料を用いた支保パターンについて各種計測結果を考慮しながら、施工性・経済性に優れた(以下、合理的と表現する)支保パターンの模索を行った。

本稿は、大断面トンネル用の合理的な支保パターン選定に至るまでの各段階における試験パターンごとの地山挙動や各種計測工の比較データを示すものである。特に 7 段階からなる各試験パターンの試行(選定プロセス)において得られた成果を逐一まとめ、各支保パターンの効果・影響を明確にすることで、今後の(大断面)トンネル施工における支保パターン選定の基礎的資料を示すことを目的とする。

2. 試験対象トンネル－清水第三トンネル－

試験施工工事として選定した清水第三トンネルは、

表-1 支保パターン(案)の主な課題

区分	標準二車線断面	大断面	主な課題		主な対処策
			施工上の課題	力学上の課題	
地山等級	CI	→	統一的地山判定		新切羽評価点 ^{3),4)}
一掘進長 m	1.5	→	効率的掘削量 大規模掘削(下半部)		TBM 導坑先進掘削による前方地質確認 ²⁾
吹付けコンクリート厚 cm	15	20	大量施工(厚さ・面積)	作用効果と最適厚さ 所用強度	高強度や補強材による薄肉化
ロックボルト	長さ m	4	6	長尺上向き施工	高耐力化による打設量(本数)低減
	間隔 m	1.2	→	大量(打設数)施工	短尺ボルト採用
	周方向延長方向	1.5	→	孔壁自立できない地山	
鋼アーチ支保工	H-150	H-200	長大部材の設置方法	作用効果と最適部材寸法	高規格化によるサイズダウン・SFRS [※] による代替
覆工コンクリート厚 cm	30	50	大量施工	作用荷重と補強の必要性	高強度や補強材による薄肉化
インバート厚 cm	なし	50	大規模掘削量	作用荷重と必要性	未設置箇所の試験施工 継続監視

※SFRS : 「鋼纖維補強吹付けコンクリート」の意

表-2 新しい支保材料の規格・目的⁵⁾

工種	従来の規格	新材料の規格	目的
吹付けコンクリート	$\sigma_{28day} = 18 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{1day} = 5 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{28day} = 36 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{1day} = 10 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{3hour} = 2 \text{ N/mm}^2$	<ul style="list-style-type: none"> 高強度化することで厚さ低減化 初期強度発現性を上げ、拘束力を高めることで支保効果の向上
	プレーン(Plain)	鋼纖維補強(SFRS)	<ul style="list-style-type: none"> 韌性を付与し設計厚低減化 鋼アーチ支保工の省略化
鋼アーチ支保工	SS400 降伏強度 245 N/mm ² 引張強度 400 N/mm ²	SS540 相当 降伏強度 440 N/mm ² 引張強度 590 N/mm ²	従来 H-200 と同等耐力(曲げ・軸力)を高規格鋼 HH-154 が満足するため、軽量化による経済性・施工性の良いこの材料で代替化
ロックボルト	耐力 120~180 kN	耐力 300~400 kN	高耐力化で本数低減、深部のゆるみや浅部の小崩落を対象とした 2 種類のロックボルトで安全性・施工性・経済性の確保

現東名の清水 IC の北約 6km に位置し、延長 1,120m(下り線)、最大土被り 186m のトンネルである。トンネル地山の地質²⁾は、新第三紀中新世後期～鮮新世前期の浜石岳層群を基盤とし、その上部に第四紀の崖錐堆積物が存在する。浜石岳層群は、砂岩優性の砂岩泥岩互層と砂岩層に分類され、砂岩泥岩互層の上部に砂岩層が存在する。新鮮岩の弾性波速度は、3.4～3.5km/sec と比較的高く、一軸圧縮強度も平均 60～70MPa を有するものである。岩自体は比較的硬いものの、断層の影響と考えられる亀裂が発達した地山構造となっている。

このトンネルの大部分は、JH 基準の地山等級 CI に分類される比較的良好な地山条件であり²⁾、その中でも試験施工区間はトンネル施工区間ににおいて良好な部分を選択している。そのため、地山の変化による影響は比較的小さいものと考えられる。

トンネルの掘削工法は、上部半断面に直径 5m の TBM による先進導坑を先行掘削し、後日上部半断面ベンチカット方式により、本坑拡幅掘削を行う TBM

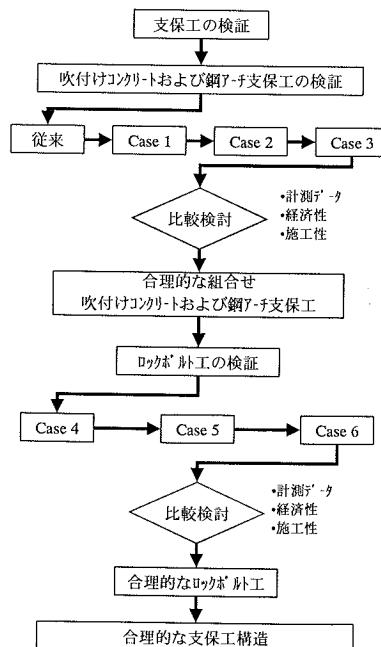


図-1 大断面トンネルの支保パターンの選定プロセス

導坑先進拡幅掘削工法である。本工法の特徴は、先進導坑による地山確認を行うと同時に先進導坑内よりロックボルトやアンカーを打設し、扁平な大断面トンネルで施工上の課題とされる拡幅時のアーチ部の安定性を確保する効果を目指した点にある。

3. 主な課題と試験材料

JH では大断面トンネルの計画当初において、従来の材料を用いた支保パターンの案を机上検討により設定¹⁾した。主対象の扁平な大断面トンネルの場合、従来の二車線トンネルに比べ、一次支保工には軸部材としての効果に加え、曲げ部材としての機能も求められ、一次支保工の役割が非常に重要となる。その結果、従来の材料を用いた支保構造では支保の施

工数量が多く、施工スピードがあがらない等の問題が浮上した。

そのため、施工技術上の課題を整理した上で、新しい支保材料も視野に入れた支保構造を検討し、①吹付けコンクリート、②ロックボルト、③鋼アーチ支保工、④覆工コンクリートの各部材について、安全性・施工性・経済性等を総合的に判断して、合理的な支保構造の確立を目指すこととした。

従来材料による支保パターン(案)における主な課題を表-1に、新しい支保材料を用いた支保構造の検討における新材料の規格・目的を表-2に示す⁵⁾。

新材料を使用した合理的な支保パターンの選定にあたっては、先ず材齢 28 日強度($\sigma_{28\text{day}}$)が 36 N/mm^2 を満足する吹付けコンクリート(以下、高強度吹付けコンクリート)の適用性を確認した後、高強度吹付けコンクリートをベースに鋼纖維補強を施した吹付け

表-3 試験パターン一覧表

支保パターン	従来標準	Case.1	Case.2	Case.3	Case.4	Case.5-1	Case.5-2	Case.6
一掘進長	1.5m	1.5m	1.5m	1.5m	1.5m	1.5m	1.5m	2.0m
吹付け コンクリート (Type)	18 N/mm^2 $t = 20\text{cm}$ (Plain)	36 N/mm^2 $t = 20\text{cm}$ (Plain)	36 N/mm^2 $t = 15\text{cm}$ (Plain)	36 N/mm^2 $t = 15\text{cm}$ (SFRS)	36 N/mm^2 $t = 15\text{cm}$ (SFRS)			
鋼アーチ支保工 (材質)	H-200 SS400	HH-154 SS540	HH-154 SS540	なし	(HH-154) (SS540)	(HH-154) (SS540)	なし	なし
ロックボルト	上半 p:間隔 N:本数 下添字: 半長	L=6m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_6=17$ 本	L=6m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_6=17$ 本	L=6m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_6=17$ 本	L=6m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_6=14(13)$ 本	L=6m 27t $p=1.6\text{m}$ $N_6=9(10)$ 本	L=6m 30t, L=4m 18t 交互配置 $p=1.2\text{m}$ $N_6=9(10)$, $N_4=9(10)$	L=6m 30t $p=1.5\text{m}$ $N_6=15(16)$
	下半 下添字: 半	L=6m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_6=8$ 本	L=6m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_6=8$ 本	L=6m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_6=8$ 本	L=6m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_6=5$ 本	L=4m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_4=6$ 本	L=4m 18t $p=1.2\text{m}$ $N_4=6$ 本	L=4m 18t $p=1.5\text{m}$ $N_4=4$ 本
主な検証目的	吹付けコンクリート厚&鋼アーチ支保工					高耐力ロックボルト		一掘進長

表-4 吹付けコンクリートの配合条件

種別	$\sigma_{3\text{hour}}$ N/mm^2	$\sigma_{1\text{day}}$ N/mm^2	$\sigma_{28\text{day}}$ N/mm^2	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m^3)					
						W	C	S	G	SF	Ad
普通	----	5	18	66	59	200	304	1050	737	----	$C \times 0.9\%$
高強度	2	10	36	45	60.5	203	450	991	673	----	$C \times 0.9\%$
高強度 SFRC	2	10	36	45	70	203	450	1114	481	78.5	$C \times 1.3 \sim 1.6\%$

表-5 鋼アーチ支保工の物性値

種別	降伏点 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	伸び %
従来鋼 (SS400)	≥ 245	$\geq 400 \sim 510$	≥ 17
高規格 (SS540)	≥ 440	≥ 590	≥ 17

表-6 ロックボルトの物性値

種別	長さ	ふし形状	規格	呼び径 mm	降伏荷重 kN	破断荷重 kN
従来-1	6m	ねじりふし	STD510	TD24	≥ 179.3 (ネジ部) ≥ 226.4 (素材部)	≥ 242.1 (ネジ部) ≥ 305.8 (素材部)
従来-2	4m	ねじふし	SD295A	D22	≥ 113.7 (ネジ・素材)	≥ 185.2 (ネジ・素材)
高耐力-1	6m	ねじふし	SD345	D32	≥ 277.9 (ネジ・素材)	≥ 397.0 (ネジ・素材)
高耐力-2	6m	ねじふし	SD585	D25	≥ 296.6 (ネジ・素材)	≥ 405.6 (ネジ・素材)

表-7 各 Case 代表位置の天端沈下量および内空変位量

STA.	坑口から の距離 m	Case	切羽 ※	最大天端沈下 量 mm		最大内空変 位量 mm		
				上半		最終		
				上半	最終	上半	最終	
913+60A	159	従来		81.0	-15	-20	-6	-13
914+10A	204	1		85.8	-9	-10	-5	-5
914+41A	234	2		76.3	-7	-7	-1	-2
913+70B	197	2'		74.0	-3	-7	-3	-4
916+80A	474	3		68.3	-5	-7	-2	-2
914+40B	266	4		74.0	-4	-6	-9	-12
915+35B	362	5-1		76.8	-4	-7	-2	-7
916+90B	517	5-2		57.0	-5	-9	-4	-13
918+50B	679	6		85.0	-5	-10	-7	-7

上り線(A)坑口: STA912+06A 下り線(B)坑口: STA911+73B ※切羽評価点

コンクリートとすることで鋼アーチ支保工の省略化について検討した^{6),7)}。さらに、ロックボルトの高耐力化を図り、その打設本数や打設パターンについて検討を試みた。本稿における支保パターンの選定プロセスを図-1に示すとともに、各試験パターンの一覧を表-3に示す。また、表-4～表-6には採用した吹付けコンクリートの配合、鋼アーチ支保工およびロックボルトの物性をまとめて示す。

4. 大断面トンネルにおける合理的な支保パターンの選定プロセス

(1) 従来の材料を使用した支保パターン

大断面トンネルに対して新材料による支保パターンの試行を行う前段階として、従来の材料規格を用いた一般的なトンネルの支保パターンによる施工が、表-1に示す施工技術上の要求課題を満足し、さらに安全かつ継続的な施工が可能であるかについて実験的検証を試みた。なお、当試験パターンの範囲は、本坑拡幅掘削上り線の 69m (STA913+31～914+00, 土被り 62m～78m) 間である。

掘削後における地山挙動として、代表位置の天端沈下量や上半水平内空変位量を計測した計測工 A のデータを表-7に示す。なお、同表は以降の支保パターン (Case.1~6) における代表位置の天端沈下量および上半水平内空変位量も含んでいる。

ここで当該区間における鋼アーチ支保工 (SS400), 吹付けコンクリート ($\sigma_{28\text{day}} = 18 \text{ N/mm}^2$) およびロックボルト (STD510) に発生した応力と軸力の計測結果を図-2～図-4にまとめて示す。なお、本研究においては、次のような事由から、それぞれ縁応力、軸力をグラフの整理を行っている(以下、同様)。

- ・ 鋼アーチ支保工：扁平形状のトンネルのため、

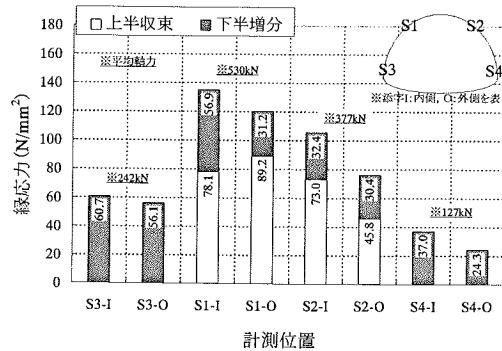


図-2 従来支保パターンにおける鋼アーチ支保工軸力

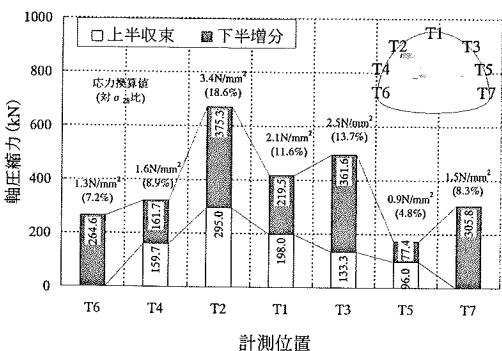


図-3 従来支保パターンにおける吹付けコンクリート軸力

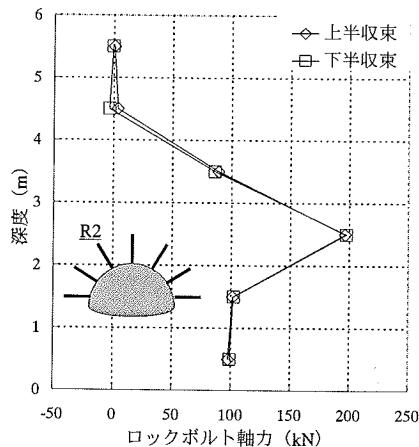


図-4 従来支保パターンにおけるロックボルト軸力

- 過度な曲げ応力の発生状況を確認する目的から、支保工の内側・外側の縁応力を評価。
- 吹付けコンクリート：いくつかの支保材料の組合せや吹付け厚さを変えた時の軸力発生状況を評価する目的から、軸力を評価。
 - ロックボルト：打設パターンによる最大軸力発生箇所を求めるため(必要長さの判定)，各 Case

のうち最大軸力が発生したロックボルトで評価。図-2に示す結果より、鋼アーチ支保工に作用する緑応力は最大 135N/mm^2 （軸力 530kN ）に及んでいることが分かる。

また、図-3に示す吹付けコンクリートの収束時軸力に着目すると、収束値が最大 670kN となったが、応力換算では 3.4N/mm^2 と設計基準強度 (18N/mm^2) の約 $1/5$ 以下であった。

一方、図-4に示すロックボルトにおいては、最大で 200kN (R2 深さ 2.5m) の軸力が局所的に発生した。これは、降伏荷重 226.4kN (破断荷重 305.8kN) にまでは及ばないものの約 90% に達するレベルであった。ここでは、最大軸力の発生したロックボルトについてのみ図示している(以下同様)。また、表-7に示すように天端沈下量と上半水平内空変位量は、上半収束時、最終時でそれぞれ最大 15mm , 19mm および 6mm , 12mm にまで達した。この合計変位量は掘削半径 $9,600\text{mm}$ のおよそ 0.35% 程度、 0.20% 程度に相当するものであるが、その変位収束状況や掘削終了後の目視観察(吹付けコンクリートのひび割れや鋼アーチ支保工・ロックボルト頭部の変状など)に異常はみられなかった。

(2) 高規格鋼アーチ支保工および高強度吹付けコンクリートによる支保パターン—Case.1—

Case.1 では、先ず高規格鋼アーチ支保工および高強度吹付けコンクリートの採用を試みた。なお、従来の標準支保パターンに対して吹付けコンクリートは設計厚さ $t = 20\text{cm}$ として施工した。Case.1 では主な検証項目として、①サイズダウン ($H-200 \rightarrow HH-154$) した鋼アーチ支保工が軸力部材として有効に機能するかについて、および②吹付けコンクリートに過度な曲げ応力が作用しないか⁸⁾について実験的な確認を行った。当試験パターンは、先の従来材料による試験パターンに続いた 30m 区間 (STA914+00~914+30, 土被り $78\text{m} \sim 83\text{m}$) で実施した。

試験に用いた高規格鋼アーチ支保工は、曲げ加工後の変形(伸び)性能を保持できるよう、SS540 材を成分調整した H 型鋼である⁹⁾。これに高強度吹付けコンクリート ($\sigma_{28\text{day}} = 36\text{N/mm}^2$) を併用することで、鋼アーチ支保工の建て込み時間の短縮化による作業効率の向上を図るとともに、はね返り低減化による材料ロスおよび作業環境の改善を目指した⁶⁾。

先述の表-7に示すように天端沈下量と上半水平内空変位量は、それぞれ最大 9mm , 5mm となり、このデータの範囲内では従来材料による支保パターンと比して効果が確認できる。

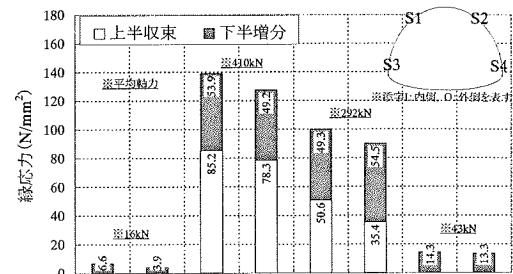


図-5 Case.1 パターンにおける鋼アーチ支保工軸力

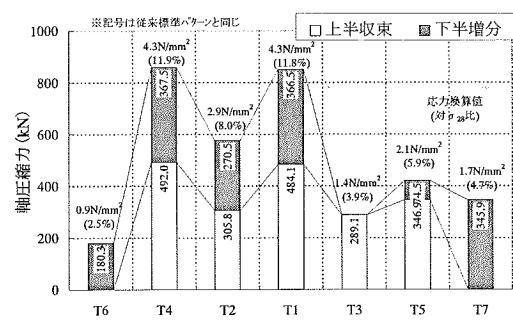


図-6 Case.1 パターンにおける吹付けコンクリート軸力

ここで、鋼アーチ支保工に作用した軸力分布の一例を図-5に、さらに吹付けコンクリートの軸力分布を図-6に示す。

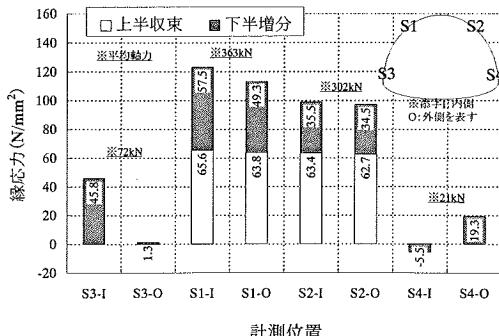
先ず鋼アーチ支保工に生じた軸力・緑応力について、従来の材料を使用した支保パターンと比べると(図-2 と図-5 の比較)，最大軸力は 550kN (S1) \rightarrow 430kN (S1) と約 20% 減少しており、またサイズダウンしているにも拘わらず最大緑応力も $120 \sim 140\text{N/mm}^2$ 程度で全て圧縮応力下にあったことが分かる。

次に、吹付けコンクリートの軸力の比較(図-3 と図-6)では、最大 670kN (T2) \rightarrow 860kN (T4) と約 28% 増加したことが分かる。しかしながら、その軸力も応力換算値では 4.3N/mm^2 (下半収束時 101day) と設計基準強度 ($\sigma_{28\text{day}} = 36\text{N/mm}^2$) のおよそ 12% に相当する応力レベルであり、全域で圧縮応力下にあり過度な曲げ応力の発生は認められなかった。

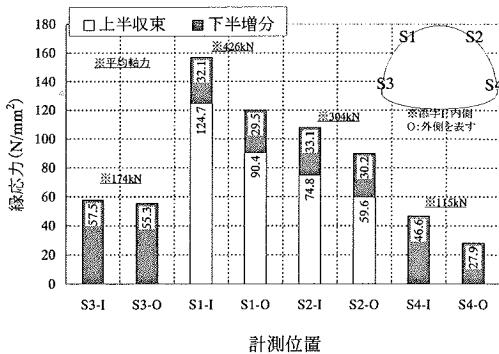
これらの試験結果を受け、高強度吹付けコンクリートの薄肉化による支保構造のさらなる効率化が図れるものと判断し、Case.2 へ移行した。

(3) 高強度吹付けコンクリートの薄肉化—Case.2—

Case.2 では、Case.1 の支保パターンを参考に、吹



A) インバートなし (Case.2)



B) インバートあり (Case.2')

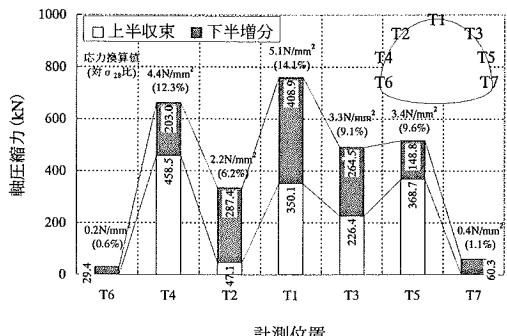
図-7 Case.2 パターンにおける鋼アーチ支保工軸力

付けコンクリート厚を薄肉化($t = 20\text{cm} \rightarrow 15\text{cm}$)することの有効性について検討した。この Case.2 では、薄肉化した高強度吹付けコンクリートと高規格鋼アーチ支保工(HH-154)の組合せによって、そこに生じる軸力等が許容応力内に収まるか否かについて確認を行った。

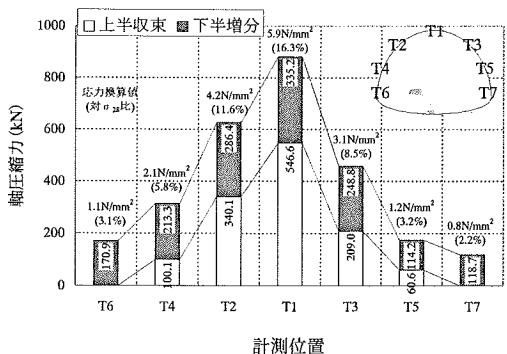
Case.2 の試験範囲は、Case.1 に続く上り線 40m 間 (Case.2 : STA914+30~914+70, 土被り 83m~88m, インバートあり)と下り線 42m (Case.2' : STA913+50~913+92, 土被り 57m~68m, インバートなし)である。なおここでは、インバートの有無による支保効果に関する試験施工を兼ねている。

表-7 に示す Case.2 および Case.2'における天端沈下量と上半水平内空変位量については、両者間に有意な差異はなく、また若干の数値の相違はあるが、Case.1 と比してほぼ変わらないものと判断される。

ここで、図-7 に示す鋼アーチ支保工の軸力(インバート有無)によると、Case.1 の図-5 に対して 410kN(S1) → 363kN(インバートなし : S1) および 426kN(インバートあり : S1) とほぼ同程度であり、またその最大縁応力も 110~160N/mm²(圧縮)に収まるなど、吹付けコンクリートの薄肉化による影響は



A) インバートなし (Case.2)



B) インバートあり (Case.2')

図-8 Case.2 パターンにおける吹付けコンクリート軸力

あまりみられなかった。

また、図-8 に示す吹付けコンクリートの軸力においても、その最大値は Case.1 の 860kN(4.3 N/mm²)に対して、T1 の 759kN(5.1 N/mm²: インバートなし)、同じく T1 の 882kN(5.9 N/mm²: インバートあり)となっていることが分かる。地山条件等が必ずしも合致するものでなく、単純な比較はできないものであるが、吹付けコンクリートの薄肉化による悪影響は大きいものでなく、充分な耐力を有するものと判断された。

これらの計測結果を踏まえ、吹付けコンクリート耐力に十分な余裕がみられるところから、高規格鋼アーチ支保工を省略した場合においても、安全なトンネル施工が可能であるかどうか調べるために、SF を併用した吹付けによる Case.3 へ移行した。

(4) 鋼織維補強高強度吹付けコンクリート(SFRS) – Case.3 –

Case.3 では、薄肉化した高強度吹付けコンクリートに、鋼織維(SF)を混入することで韌性を向上させ、鋼アーチ支保工の省略化の可能性について検討した。本稿では以降において、この鋼織維補強高強度吹付

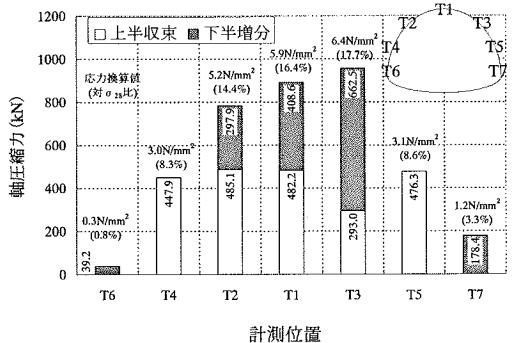


図-9 Case.3 パターンにおける吹付けコンクリート軸力

けコンクリート(Steel Fiber Reinforced Shotcrete)を”SFRS”と略記する。なお試験施工は、上り線STA916+60~917+29、土被り95m~123mの69m区間で実施した。

ここで表-7に示す天端沈下量と上半水平内空変位量に着目すると、最大変位は2~4mm程度とこれまでの支保パターンに比して小さいことが分かる。

また、SFRSに生じた軸力は、図-9に示すように右肩部(T3)で最大956kNであり、Case.2の最大軸力882kNに対して8.4%の増加にとどまるものであった。応力レベルで比較しても $5.9\text{N/mm}^2 \rightarrow 6.4\text{N/mm}^2$ 程度の増加であり、また、内空変位等の収束状況や掘削終了後の坑内観察において異常がみられなかつたことから、厚さ15cmと薄肉化したSFRSによる支保パターンとして鋼アーチ支保工の省略化による影響は大きなものでないと判断できた。

上記の成果を踏まえ、以降の試験では鋼アーチ支保工を用いない厚さ15cmのSFRSを基本的な支保パターンと考え、Case.4~6において高耐力ロックボルトの適用性の検証を試みた。但し、Case.4およびCase.5の一部の試験施工では、一部高規格鋼アーチ支保工を用いている。

(5) 高耐力ロックボルト—Case.4-

Case.4では、先のSFRS支保構造に対して高耐力ロックボルト(SD345)を併用した時のロックボルト打設本数および打設パターンについて基礎データを得ることを目的とする。具体的には、上半部のロックボルトを高耐力化(降伏荷重約278kN)することで、従来の1.2mから1.6mまで打設間隔を広げ(打設本数n=25本→n=18~19本)、作業効率の向上とコスト縮減を図った。なお、Case.4の試験施工は、本坑拡幅掘削下り線のSTA914+19~914+84(土被り75m~101m)範囲にある65m区間で実施したものである。

当該区間における主計測断面914+39(B)において、

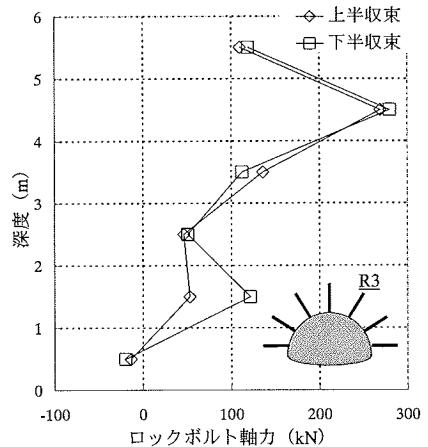


図-10 Case.4 パターンにおけるロックボルト軸力

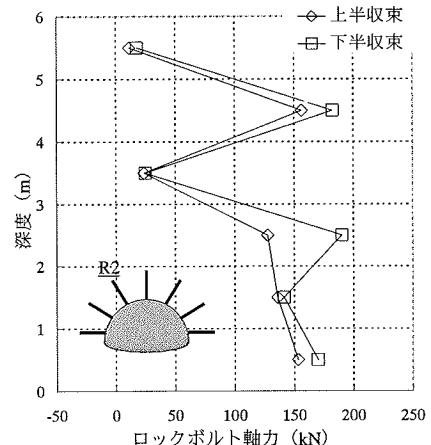


図-11 Case.5-1 パターンにおけるロックボルト軸力

計測したロックボルト軸力分布を図-10に示す。

図-10に示すように、右肩部(R3)の深さ4.5m位置で収束時の値が290kNに達し、設計耐力を上回る値が確認された。この結果を踏まえ、以降のCase.5~6に用いる高耐力ロックボルトでは、材質をSD585としていっそその高強度化を図るとともに、従来タイプのD25と同等径のものを使用することとした。さらに、ロックボルトの打設間隔は、より密に配置するべきと判断し、Case.5においては打設間隔を従来のP=1.2mに戻して試験施工を試みた。

(6) ロックボルトの打設パターン—Case.5-

Case.5における試験では、主としてロックボルトの適当な打設パターンを求めることが目的である。そこで打設したロックボルトは、普通耐力タイプ(180kN)および先の結果を踏まえた高耐力タイプ(300kN)の2種類であり、下記のような打設パター

ンについて実験的調査を行った。

a) 普通耐力ロックbolt (Case.5-1)

Case.4 と同様に鋼アーチ支保工を用いない SFRS による支保パターンを基本とし、さらにトンネル壁面近傍の小規模な岩塊の落下対策として普通耐力ロックbolt ($L = 4.0\text{m}$) を、比較的深部まで補強する高耐力ロックbolt ($L = 6.0\text{m}$) と併用した。両ロックbolt は、1.2m 間隔で交互配置することで、作業効率と経済性の向上を図った。なお、Case.5-1 における試験範囲は、本坑拡幅掘削下り線の約 50m (STA915+09～915+59、土被り 110m～96m) 区間である。

計測断面 STA915+35(B) におけるロックbolt 軸力の一例を図-11 に示す。この結果より、 $L = 4.0\text{m}$ のロックbolt では概ね 100kN 以下であったのに対し、 $L = 6.0\text{m}$ のロックbolt (R2) において、深さ 2.5m および 4.5m 位置で最大 200kN 程度にまで達した。Case.4 におけるロックbolt 軸力 (打設間隔 1.6m) と比べると、短尺 4m のロックbolt を併用した打設間隔 1.2m の支保パターンの効果が確認される。但し、一部のロックbolt において、過度な応力負担がみられ、通常のロックbolt では耐力不足となる可能性も考えられる。

b) 高耐力ロックbolt (Case.5-2)

先の結果を踏まえると、上半部に $L = 6\text{m}$ および $L = 4\text{m}$ の高耐力ロックbolt を交互打設することは、安全かつ継続的な施工が充分可能であると考えられる。しかしながら、作業効率の向上とコスト縮減を目的とする場合、高耐力ロックbolt の打設本数低減などさらに検討を図る必要があると判断した。

天端部に対して、TBM 導坑内からケーブルbolt を事前に打設し安全性を補った上で、打設間隔 1.2m で異なる長さのロックbolt ($L = 4.0\text{m}, 6.0\text{m}$) を交互に配置した。なお、Case.5-2 における試験範囲は、本坑拡幅掘削下り線の約 24m (STA916+76～917+00、土被り 107m～118m) 区間である。また、計測工 B は STA916+90(B) を主計測断面として実施した。

計測工 B におけるデータのうち、SFRS 軸力およびロックbolt 軸力をそれぞれ図-12、図-13 に示す。

図-12 より、収束時の値は最大 1045kN (7.0N/mm^2) とより大きな軸力となったが、耐力には充分な余裕があり、且つ目立った変状も確認されなかったことから、施工に支障はないものと判断した。

また図-13 に示すように、6m 長の高耐力ロックbolt (R4) において、深さ 1.5m 位置で最大 160kN に達したが、4m 長の普通耐力ロックbolt では、概ね 100kN 以下であった。

Case.5 の結果より、高耐力ロックbolt を併用し

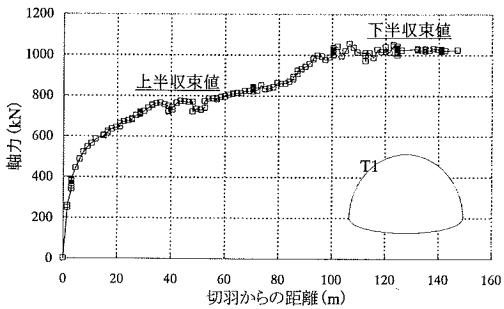


図-12 Case.5-2 パターンにおける SFRS 軸力

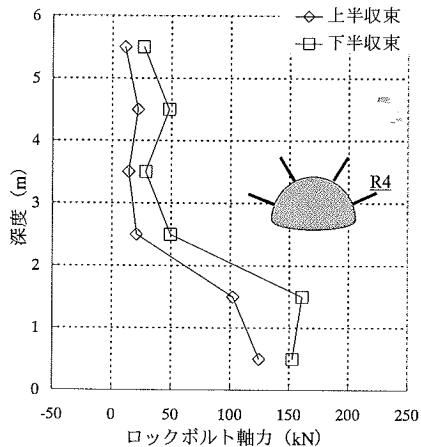


図-13 Case.5-2 パターンにおけるロックbolt 軸力

た支保パターン(異長ロックbolt 1.2m 間隔、厚さ 15cm の SFRS)では、安定な施工を行うことができた。この成果を踏まえ、さらなる作業効率向上およびコスト縮減を図るために、一掘進長を従来の 1.5m から 2.0m まで延伸する Case.6 へ移行した。

(7) 一掘進長の延伸—Case.6—

この試験パターンでは、一掘進長を延伸する目的から厚さ 15cm の SFRS に 6m 長の高耐力ロックbolt のみを用いることとした。ここで、Case.5 の結果から推察されるように、耐力 300kN 程度の高耐力ロックbolt を打設間隔 1.2m で使用する場合、耐力に十分な余裕があり、作業効率の向上とコスト縮減の観点から打設本数の低減可能と判断し、ロックbolt の打設間隔を Case.4 で試行した 1.6m 以下の 1.5m とした。

Case.6 における試験範囲は、本坑拡幅掘削上り線の約 56m (STA918+40～918+96、土被り 141m～135m) 区間である。また、SFRS やロックbolt 軸力を計測する計測工 B は STA918+52(B) 断面において

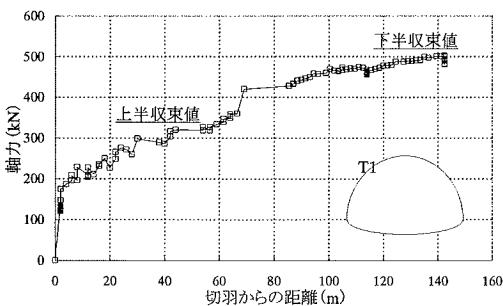


図-14 Case.6 パターンにおける SFRS 軸力

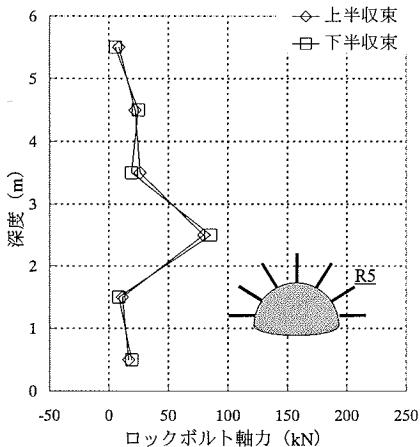


図-15 Case.6 パターンにおけるロックボルト軸力

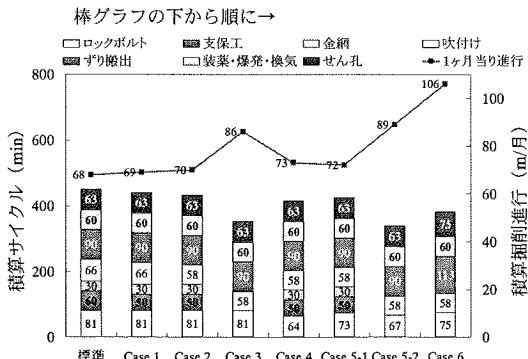


図-16 各 Case 別サイクルタイムと掘削速度(積算)

実施したが、地中変位計による地山内のひずみは測定していない。

一掘進長を 2.0m に延伸し、ロックボルト打設間隔を 1.5m にした際の SFRS 軸力およびロックボルト軸力の一例をそれぞれ図-14、図-15 に示す。

図-14 によると、SFRS の軸力は最大でも 502kN (3.3N/mm^2) 程度に収まり、SFRS の設計基準強度 ($\sigma_{28\text{day}}=36\text{N/mm}^2$) の 1/10 を下回っている。また、

図-15 に示すロックボルト軸力の最大値も 100kN 程度と小さいものであった。

一掘進長を 2.0m に延伸した場合においても、SFRS やロックボルトに過度な応力が作用せず、且つ目立った変状等も現れなかったことから、Case.6 で採用した支保パターンで安全かつ継続的な施工ができるものと判断された。

作業効率向上およびコスト縮減の目安となるサイクルタイムと掘削速度(積算)を示した図-16 によると、一掘進長 2.0m とする Case.6 は、積算掘削進行が 108m/月で最も優れているのに比して、積算サイクルとして最も効率的な Case.5-2 より僅かに増加する程度であることが分かる。この成果を踏まえ、本研究で対象とした比較的良い地山条件における大断面トンネル施工において、Case.6 は暫定的な標準支保パターンとみなすことができた。

5.まとめ

大断面トンネルにおける支保パターンの効率化は、第二東名・名神高速道路等に代表される今後のトンネル建設においてその意義は大きいものと考えられる。本稿は、比較的良好な地山条件下において施工された清水第三トンネルを対象に、ここで行った合理的な支保パターンの模索過程(選定プロセス)を示したものである。その現場実験の過程から、今後のトンネル施工技術にとって有用なデータがいくつか得られた。本試験における諸計測値は、TBM 導坑先進拡幅掘削工法に限るものであるが、この支保パターンの選定プロセスにおいて得られた知見を以下に列挙する。

- ① 高強度吹付けコンクリートを併用し、高規格の鋼アーチ支保工にすれば H-200 から HH-154 へのサイズダウンが可能な場合があることが示された。
- ② 詳細な地山評価が必要であるが、鋼繊維補強高強度吹付けコンクリート(SFRS)を採用することで、鋼アーチ支保工の省略化が可能である。また、設計厚さ 15cm とした場合も厚さ 20cm と同程度の支保効果を発揮できることから建設コストの縮減が図れる。
- ③ ロックボルトの打設間隔を大きくした結果、過度な軸力発生が認められことなどから、高耐力材料の適用が有効な手段と考えられる。
- ④ 長さ 6.0m の高耐力ロックボルトと厚さ 15cm の鋼繊維補強高強度吹付けコンクリート(SFRS)を併用した支保パターンとすることで、一掘進

長を 2.0m にしても安全かつ合理的な施工ができたことから、その適用の可能性が示された。

参考文献

- 1) 三浦 克:大断面道路トンネルと山岳トンネル工法の現状と課題, 土木学会論文集, No.516/VI-27, pp.1-13, 1995.6.
- 2) 田中 一: 清水第三トンネルの TBM 導坑ブレイクスルー(貫通), トンネルと地下, Vol.28, No.6, pp.17-18, 1997.6.
- 3) 中田雅博, 三谷浩二, 八木 弘, 西 琢郎, 西村和夫, 中川浩二: 切羽観察の分析に基づく新しい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.
- 4) 赤木 渉, 佐野 理, 進士正人, 西 琢郎, 中川浩二: 山岳トンネル施工支援のための切羽評価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.
- 5) 田中 一, 青山繁夫: 第二東名高速道路における超大断面トンネルの試験工事 清水第三トンネル(総括); その 1), トンネルと地下, Vol.31, No.8, pp.17-18, 2000.8.
- 6) 三谷浩二, 海瀬 忍, 吉武 勇, 中川浩二: はね返り低減を志向した繊維補強吹付けコンクリートの模索と合理的な配合, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.37-50, 2002.6.
- 7) 三谷浩二, 海瀬 忍, 吉武 勇, 中川浩二: 鋼纖維補強吹付けコンクリートのトンネル試験施工とその適用性評価, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.32-42, 2002.9.
- 8) 三谷浩二, 吉塚 守, 吉武 勇, 中川浩二: 崩壊事例に基づいた吹付けコンクリートの曲げ破壊検証実験, 土木学会論文集, No.734/III-59, pp.249-259, 2003.6.
- 9) 小林隆幸, 寺本 哲, 小門 武, 篠原雅樹: トンネル支保工の高規格化への取り組み 大断面トンネルへの適用に向けて, トンネルと地下, Vol.29, No.9, pp.49-56, 1998.9.

(2004. 2. 4 受付)

FIELD TEST ON THE RATIONAL SUPPORT SYSTEM FOR LARGE-SCALE TUNNEL

Mamoru YOSHIDUKA, Koji MITANI, Hajime TANAKA,
Isamu YOSHITAKE and Koji NAKAGAWA

The purpose of this study is to obtain the fundamental data for rational support system of the large-scale tunnel. Especially, the field test with new materials was carried out for obtaining the support effect of each member. This paper presents the measurement data and knowledge from the field test in order to contribute the future execution for large-scale tunnel. As the test results, the system with the high strength rock bolt and high strength fiber reinforced shotcrete could sufficiently support with excavating velocity of 2 m/day.