

高速道路トンネルにおける 高規格鋼アーチ支保工の標準化

中田 主税¹・岩尾 哲也¹・小川 澄²

¹正会員 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail:c.nakata.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 中日本高速道路(株) 東京支社 清水工事事務所 (〒424-0114 静岡県静岡市清水区庵原町219-11)

現在、高速道路2車線トンネルの支保構造は、高強度の支保部材を採用した高規格支保パターンが標準となっている。しかし、坑口部等の小土被り区間以外の一般部については、高規格鋼アーチ支保工の適用に至っておらず、吹付けコンクリート厚のみが低減されたことで、鋼アーチ支保工の突出量が従来支保パターンに比べ大きくなっていった。覆工としては部材が均一な厚さの方が構造上望ましく、また、突出量を低減することで、施工性の向上も期待できる。そこで、高規格支保構造の更なる合理化として、高規格鋼アーチ支保工の一般部への適用性について、室内試験および試験施工を行い構造安定性や施工性を検証した。その結果、高規格鋼アーチ支保工の一般部への適用は可能であるという結論を得た。

Key Words : Expressway, Two lanes tunnel, High- strength steel support, High- strength support pattern

1. はじめに

高速道路2車線トンネルの支保構造は、平成21年7月から表-1に示すとおり、従来に比べ高強度の支保部材を採用し、支保構造の安定性を確保した上で支保部材の薄肉化やロックボルト本数の低減を図った高規格支保パターンが標準となっている。しかし、鋼アーチ支保工は、坑口部等の小土被り区間(DⅢ区間)では、従来鋼(NH-200)と軸方向降伏曲げモーメントが同等程度で、大断面トンネルでの施工実績がある高規格鋼(HH-154)を採用しているが、一般部では従来鋼(NH-125, NH-150)に対応する高規格鋼の製作実績がなく、品質等の性能が確認されていなかったため、高規格鋼の採用に至っていない。このため、一般部では吹付けコンクリート(以下、「吹付け」という。)の厚さが低減されたことで、図-1に示すとおり鋼アーチ支保工の突出量が従来に比べ大きくなっていった。覆工としては、部材が均一な厚さの方が構造上望ましく、また、鋼アーチ支保工を薄肉化し突出量を低減することで、覆工の品質向上、施工性の向上、コスト削減が期待できる。

本稿では、高規格支保構造の更なる合理化として、高規格鋼の一般部への適用性について、室内試験と試験施

工を行い構造安定性や施工性を検証した結果を報告するものである。

表-1 支保部材の比較

支保部材の仕様	従来支保	高規格支保
吹付けコンクリート (設計基準強度：材齢28日)	18N/mm ²	36N/mm ²
ロックボルト (降伏耐力)	110kN, 170kN	170kN, 290kN
鋼アーチ支保工 (規格, 降伏応力)	NH-200 (SS400) (≥245N/mm ²)	HH-154 (HT590/SS540) (≥440N/mm ²)

従来鋼：NH 高規格鋼：HH

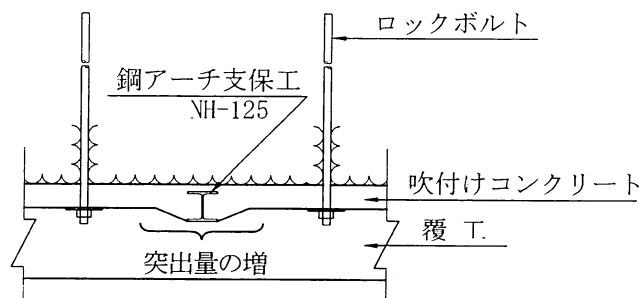


図-1 鋼アーチ支保工の突出概念図

2. 高規格鋼アーチ支保工の概要

NEXCO3社が建設する高速道路2車線トンネルに用いる高規格鋼アーチ支保工の材料仕様を表-2に示す。

鋼材を高強度化すると破断までの伸び率が小さくなる傾向となり、破断伸びが小さい場合は支保構造の急激な変形および破壊を招く可能性が考えられるため、高規格鋼の材質については、従来鋼（SS400）の伸び率と同一とし、冷間加工後の破断伸び率を17%以上になるように設定している。

一般部の高規格鋼アーチ支保工は、表-3に示すとおり従来鋼のNH-125、NH-150と比較し、降伏耐力や軸方向降伏曲げモーメントが同等程度となるHH-100、HH-108を用いることとした。これにより、鋼アーチ支保工は25～42mmの薄肉化、鋼アーチ支保工1基当りの質量は3割程度の軽量化が図れることになる。

高規格鋼は従来鋼に比べ断面サイズを低減させるため、剛性が低下する。そのため、地山の変形が増加しトンネルの安定性に影響を及ぼすことが懸念された。しかし、高規格支保パターンは従来支保パターンに比べ、高強度吹付けの初期強度発現性による周辺地山の緩み抑制効果

が高く、また、大断面トンネルにおけるFEM解析結果²⁾やこれまでの施工実績から、高規格鋼アーチ支保工の支保剛性の低下による地山の変形量や支保工応力など、トンネルの不安定化につながる影響はないと判断した。

3. 高規格鋼アーチ支保工の室内試験

高規格鋼アーチ支保工のHH-100およびHH-108は、これまで製作実績がなかったため、製作工場における材料試験、曲げ加工を行い、高規格鋼の性能を確認した。その結果、機械的性質に関して、降伏点（N/mm²）：563 ≥ 440，引張強さ（N/mm²）：653 ≥ 590，破断伸び（%）：19 > 17の試験結果が得られ、規格値を満足することが確認できた。また、曲げ加工前後の形状・寸法は、JIS規格項目（ウェブ高，フランジ幅，ウェブ反り，反り，曲がり，フランジ折れ，直角度，長さ，並行度）の許容値内に収まっていることを確認した。

表-2 高規格鋼アーチ支保工の材料仕様¹⁾

	降伏点 (N/mm ²)	引張り強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)	引張り 試験片	炭素当量 Ceq
高規格鋼(HH-〇〇)	≥ 440	≥ 590	≥ 17	1A号	≤ 0.47
従来鋼(NH-〇〇)	≥ 245	400～510	≥ 17	1A号	

- ・ 従来鋼の記号はJISの標記に従いSS400と種別する。また、寸法表示についても、型钢表示として高規格鋼をHH、従来鋼をNHとする。
- ・ 高規格鋼は、従来鋼（SS400）の伸び率を同一にしたもので、JISで規定されているSS540の仕様を基に引張り強さ590N/mm²以上にし、冷間加工後の破断伸び率を17%以上になるよう設定したもの。
- ・ 高規格鋼の破断伸び率は、ひずみ時効後も17%以上とする。ひずみ時効とは、鋼材に予ひずみを付加し、250℃の油槽に1時間浸漬して時効処理（促進試験）を行った後に起きる延性・靱性の値を求める方法である。

表-3 高規格鋼アーチ支保工規格・寸法の比較

鋼種	寸法 (mm)	断面 積 (cm ²)	単位 質量 (kg/m)	断面係数		Zx/Zy	断面二次 モーメント (cm ⁴)		降伏 軸力 (kN)	軸方向 降伏曲 げモー メント (kN)	冷間加工 最小曲げ 半径の目 安(m)
				Zx (cm ³)	Zy (cm ³)		1x	1y			
高規格鋼	HH-200×201× 9×12	65.53	51.4	478	162	3.0	4,782	1,626	2,883	210	4.5
従来鋼	NH-250×250× 9×14	91.43	71.8	860	292	2.9	10,700	3,650	2,240	211	5.5
高規格鋼	HH-154×151× 8×12	47.19	37.0	260	91.3	2.8	2,000	689	2,076	114	3.5
従来鋼	NH-200×200× 8×12	63.53	49.9	472	160	3.0	4,720	1,600	1,556	116	4.5
高規格鋼	HH-108×104×10×12	33.91	26.6	118	43.5	2.7	636	226	1,492	52	2.5
従来鋼	NH-150×150× 7×10	39.65	31.1	216	75.1	2.9	1,620	563	971	53	2.0
高規格鋼	HH-100×100× 6× 8	21.59	16.9	75.6	26.7	2.8	378	134	950	33	1.3
従来鋼	NH-125×125×6.5×9	30.00	23.6	134	46.9	2.8	839	293	735	33	1.5
従来鋼	NH-100×100× 6× 8	21.59	16.9	75.6	26.7	2.9	378	134	529	19	1.2

4. 試験施工

(1) 試験施工の概要

室内試験の結果をうけて、高規格鋼アーチ支保工を適用した場合の支保構造の安定性および施工性を検証するため、現地トンネルにおいて試験施工を実施した。

試験施工は、地山状況や土被りが同程度と想定される区間を設けて、従来鋼と高規格鋼で順次10～20m程度の施工を行い、施工状況や計測データを比較し検討を行った。対象とした掘削支保パターンは、一般部の標準断面ではNH-125とHH-100を比較するCⅡ-bとDⅠ-bを、非常駐車帯断面ではNH-150とHH-108を比較するCⅡ-Lを対象とした。支保構造の安定性を確認するため、計測工A（天端沈下量、内空変位量、切羽観察）を5m間隔で、計測工B（ロックボルト軸力、吹付け応力、鋼アーチ支保工応力、地中変位量）をそれぞれの区間の中央付近に設置し計測を行った。

(2) 試験施工結果

本稿では、試験施工の結果、表-4 に示す各検討支保パターンにおいて、各計測結果がいずれも同様な傾向を示し、支保パターン毎による差異は見られなかったため、「③DⅠ-b パターン」の試験施工結果について報告する。

a) 切羽状況

試験施工の切羽状況は、泥質片岩を主体とし、天端から右側は亀裂間隔が5cm以下で部分的に破碎されている。土被りは25m程度で湧水は見られない。切羽評価点は区間全体をとおして30点程度であり、切羽評価点の目安³⁾からもDⅠパターン相当の地山であると考えられる。

b) 計測工A

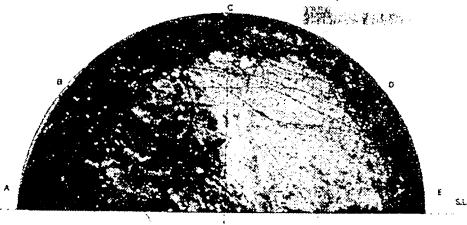
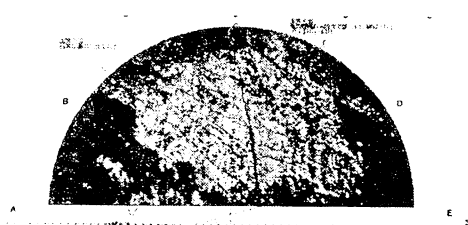
変位計測結果（計測工B設置断面）を図-2に示す。

変位収束値で比較すると、従来鋼区間では天端沈下が-5.4mm、内空変位が-6.3mmに対し、高規格鋼区間では天端沈下が-7.9mm、内空変位が-7.0mmとなり、両区間とも同程度で、いずれも管理レベルⅠ以内に収まっている。

表-4 試験施工概要

No	検討支保パターン	地質	土被り(m)	区間延長	鋼アーチ支保工の種別	計測観察項目
①	CⅡ-b	凝灰角礫岩	81	高規格鋼：40.8m	HH100	計測工A 天端沈下 内空変位 切羽観察
				従来鋼：20.4m	NH125	
②	CⅡ-b	泥質片岩	72	高規格鋼：30.0m	HH100	
				従来鋼：28.0m	NH125	
③	DⅠ-b	泥質片岩	25	高規格鋼：11.0m	HH100	計測工B ロックボルト軸力 地中変位 吹付け応力 鋼アーチ支保工応力
				従来鋼：13.0m	NH125	
④	DⅠ-b	泥質片岩	26	高規格鋼：11.0m	HH100	
				従来鋼：13.0m	NH125	
⑤	CⅡ-L	泥質片岩	59	高規格鋼：10.6m	HH108	
				従来鋼：21.4m	NH150	

表-5 試験施工区間の切羽状況

断面区分	従来鋼支保パターン：DⅠ-b-H-K	高規格鋼支保パターン：DⅠ-b-HH-K
土被り	23.5m	26.1m
岩種	泥質片岩	泥質片岩
切羽状況	天端から右側は亀裂は5cm以下で部分的に破碎される。また、茶色の粘土を挟む箇所が多く見られ、肌落ちが見られる。切羽中央から左脚部では、亀裂間隔10～15cmとなるが、発達した流れ目になり薄く粘土を挟む。また、天端や右側とは走向傾斜の方向は変わる。	天端から右側は亀裂は5cm以下で部分的に破碎される。また、亀裂に沿って変色する。切羽中央から右側では、5cm程度のサイコロ状となる。ブレーカ打撃により亀裂より崩れる。また、石英を含む。左側では10cm程度の流れ目となり亀裂面から滑り崩れる。左脚部付近でも石英が含まれるようになる。
切羽評価点	30.00	30.00
切羽写真		

c) 計測工B

支保部材の応力等測定結果を図-3～7に示す。

鋼アーチ支保工について、発生応力の最大値を比較すると、高規格鋼が73N/mm²、従来鋼82N/mm²とほぼ同程度であるが、高規格鋼は従来鋼に比べ断面積が小さいため、軸力としては高規格鋼が小さい値を示す。曲げモーメントは、両区間とも小さい値を示した。

その他の支保部材については、両区間とも同程度であり、鋼アーチ支保工の違いによる変化は見られなかった。

支保構造としては、各支保部材とも耐力には余裕があり、安定性は確保されている。

d) 支保部材の換算内圧と分担比率

支保構造の評価の目安として、計測工Bの計測データ

から各支保部材に生じている応力を作用内圧とし、軸力モデルとして支保換算内圧を施工段階ごとに算出した。支保換算内圧の算定は、各支保部材の受ける一掘進長あたりの平均内圧を算出し、全体を100とし各支保部材内圧の比率を算出するものである。高規格鋼と従来鋼の施工段階ごとの換算部材内圧と部材内圧の分担比率を図-8に示す。

支保部材の分担率に関して、従来鋼区間および高規格鋼区間ともに経時変化の傾向は同様であり、鋼アーチ支保工の違いによるロックボルトおよび吹付けの分担率が変化するなどの顕著な影響は見られなかった。

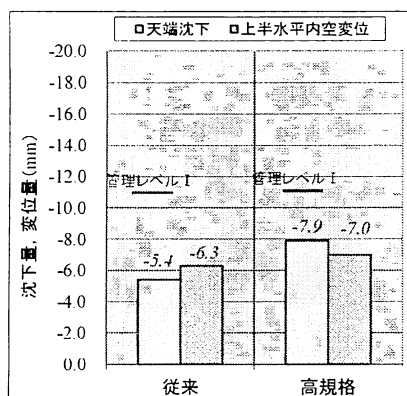


図-2 計測工 A

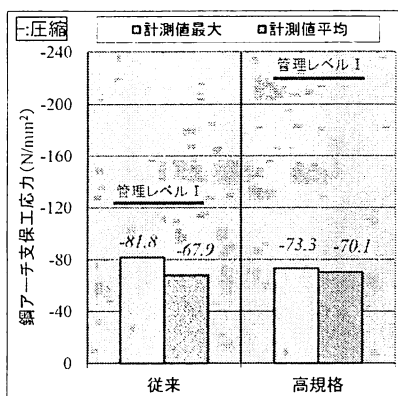


図-3 鋼アーチ支保工応力

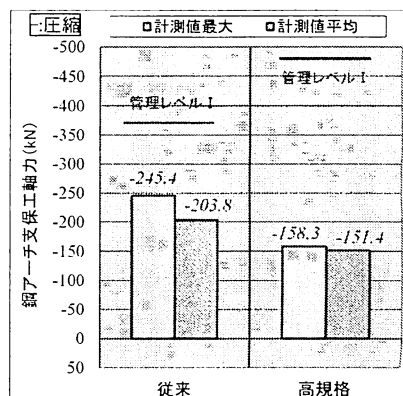


図-4 鋼アーチ支保工軸力

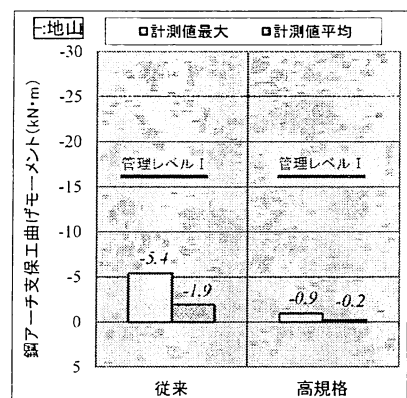


図-5 鋼アーチ支保工曲げモーメント

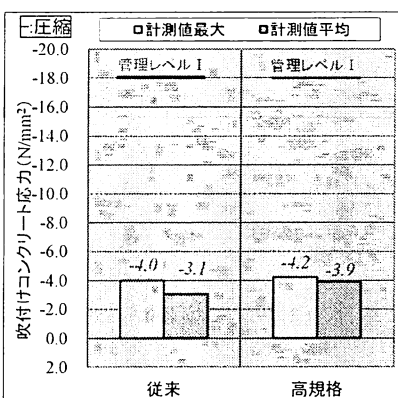


図-6 吹付けコンクリート応力

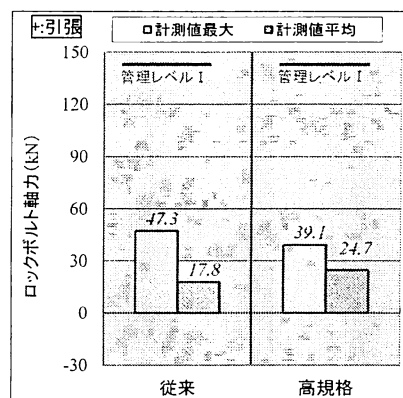


図-7 ロックボルト軸力

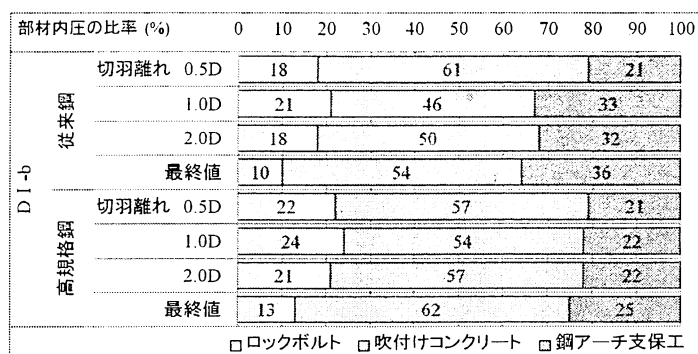
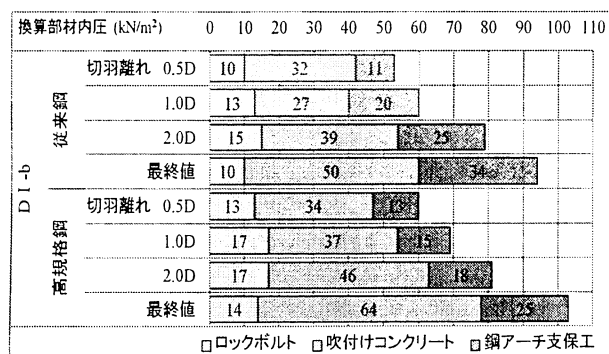


図-8 計測値の換算内圧と各支保部材の分担比率

d) 施工性

HH100は、より部材厚が薄く軽量なため、試験施工の初期段階では鋼アーチ支保工の建込み作業時に、ややふらつきが見られたが、施工の慣れとともに解消され、問題なく施工できることが確認された。また、施工者に対するヒアリング調査では、据え付けなどは鋼アーチ支保工が軽量化されるため取扱い易いといった意見や、従来鋼と比較して突出量が軽減されるため、吹付けの仕上げは良好になるといった意見があり、施工性については概ね良好であることが確認された。

5. 高規格支保と従来支保の変位データ分析

坑口部等の小土被り区間（DⅢ区間）では、既に高規格鋼アーチ支保工を適用した高規格支保パターンが採用されていることから、これまでNEXCO3社で収集しているDⅢ区間の従来支保と高規格支保の天端沈下と上半内空変位の関係について整理した。

なお、NEXCO3社では、地山の分類や切羽評価は4つの岩石グループに分けており、ここでは、高規格支保での施工実績が多かった硬質塊状岩盤について比較した。

図-9に示すとおり、硬質岩のため全体的に変位量は小さいデータではあるが、従来支保に比べ高規格支保の方が比較的変位量が小さい傾向となっている。これは、高規格支保に用いている高強度吹付けが、3時間強度で2 N/mm²以上と初期強度が高く、従来支保に比べ地山の緩み抑制効果が高いため、変位が抑制されたと考えられる。また、高規格鋼アーチ支保工の支保剛性の低下によるたわみの影響については、天端沈下が卓越するなどの影響

も見受けられず、支保構造としての安定性は確保できていると判断できる。

6. まとめ

一般部に用いる高規格鋼アーチ支保工として、これまで製作実績のなかった HH-100 と HH-108 の材料試験や曲げ加工を行い、品質等の性能を確認することができた。

試験施工では、高規格鋼と従来鋼を適用したそれぞれの区間の内空変位および各支保部材の発生応力に大きな差異はなく、支保構造の安定性が確認された。また、施工性についても高規格鋼にしたことによりサイズダウンが図られ、従来鋼と比較して突出量が低減され、吹付けの仕上げが良好になるとともに、軽量化のため施工性の向上にも繋がることが確認された。さらに、サイズダウンにより単位長さあたりの質量が減少するため、鋼アーチ支保工1基あたりのコスト削減が見込める。

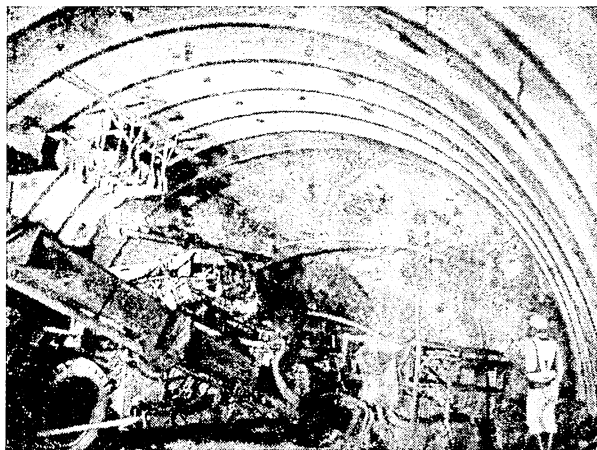
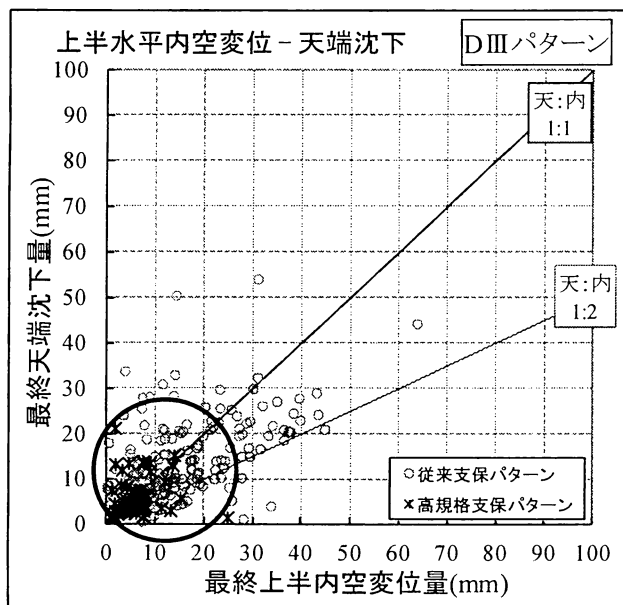
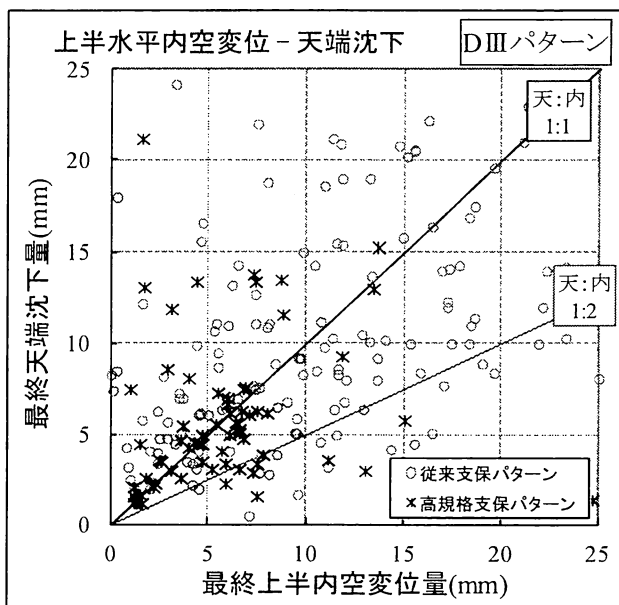


写真-1 試験施工状況



(a) 全体



(b) 囲み部拡大

図-9 DⅢパターン（硬質塊状）での天端沈下と上半内空変位の関係

表-6 高速道路2車線トンネルにおける従来支保パターンと高規格支保パターンの比較（下線部が変更箇所）

地山 等級	支保バタ ー ン	標準 1 掘 進長 (m)	ロックボルト					吹付け コンクリート (36N/mm ²)	鋼アーチ支保工		
			長さ (m)	耐力 (kN)	施工間隔 (m)		施工 範囲		片さ (cm)	上半 サイズ	下半 サイズ
					周 方向	延長 方向					
B	B－a (H)	2.0	3.0	110 ⇒ 170	1.5 ⇒ 2.0	2.0	上半 120°	5	－	－	
C I	C I－a (H)	1.5	3.0	110 ⇒ 170	1.5 ⇒ 2.0	1.5	上半	10 ⇒ 7	－	－	
C II	C II－a (H)	1.2	3.0	110 ⇒ 170	1.5 ⇒ 1.8	1.2	上下半	10 ⇒ 7	－	－	
	C II－b (H)				1.5 ⇒ 1.8	1.2			NH125 ⇒ HH100	－	
D I	D I－a (H)	1.0	3.0	170 ⇒ 290	1.2 ⇒ 1.8	1.0	上下半	15 ⇒ 10	NH125 ⇒ HH100	NH125 ⇒ HH100	
	D I－b (H)	1.0	1.0								
D II	D II－a (H)	1.0 以下	4.0	170 ⇒ 290	1.2 ⇒ 1.8	1.0 以下	上下半	20 ⇒ 15	NH150 ⇒ HH108	NH150 ⇒ HH108	
－	D III a (H)	1.0	4.0	170	1.2	1.0	上半側壁 付近	25 ⇒ 20	NH200 ⇒ HH154	NH200 ⇒ HH154	

7. おわりに

高規格鋼アーチ支保工の標準部への適用性について検討を行い、適用が可能であるという結果が得られた。これにより、表-6に示すとおり、高強度吹付けとロックボルトの高耐力化に加え高規格鋼アーチ支保工を標準採用することで、すべての支保部材を高規格化し、従来支保パターンに比べより合理化された「高速道路2車線トンネルの高規格支保パターン」を構築できたと考えている。

今後は、高規格鋼を用いた高規格支保パターンが現地展開された後のフォローアップとして、数多くの施工データを収集・分析し、支保構造の評価を行っていきたいと考えている。

謝辞：本検討に際して試験施工をご協力頂いた西日本高速道路(株)福岡工事事務所、中津工事事務所の関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 設計要領第三集 トンネル本体工建設編,pp.121-122,東日本高速道路(株),中日本高速道路(株),西日本高速道路(株),2012.
- 2) 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, トンネルと地下, 第29巻9号,pp.49-56,1998.
- 3) トンネル施工管理要領 計測工編,pp.56,東日本高速道路(株),中日本高速道路(株),西日本高速道路(株),2012.

(2012.9.3受付)

STANDARDIZATION OF HIGH-STRENGTH STEEL ARCH SUPPORTS FOR EXPRESSWAY TUNNELS

Chikara Nakata, Tetsuya Iwao, Ogawa Kiyoshi

Currently, although a high-strength support pattern using high-strength members is the standard support structure constructed in two-lane expressway tunnels, its use is limited and not employed for tunnels sections in general. But because of thinner shotcrete lining now used, the size of protrusions where conventional steel arch supports is used has increased. When lining tunnels, it is structurally better if the thickness of the members is uniform. We can also expect to improve workability by reducing the size of protrusions. So in order to verify the applicability of the high-strength steel arch support, we have conducted in-door tests and trial constructions to confirm its structural stability and workability. Our findings show that the high-strength steel arch support is structurally stable and may be applied to tunnel sections in general.