

金沢・敦賀間での新幹線山岳トンネルの 支保パターン施工実績に関する一考察

柏木 亮¹・後藤 裕太郎²・上野 光³・大崎 雄治⁴・岸田 潔⁵

¹正会員 (独) 鉄道・運輸機構 北陸新幹線建設局 敦賀鉄道建設所
(〒914-0055 福井県敦賀市鉄輪町一丁目 3-26)
E-mail: kashiwagi.ryo-p55b@jrnt.go.jp

²正会員 (独) 鉄道・運輸機構 北陸新幹線建設局 計画部 開業準備課
(〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原三丁目 5-36 (新大阪トラストタワー))
E-mail: goto.yut-3d8m@jrnt.go.jp

³(独) 鉄道・運輸機構 設計部 設計第二課
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町六丁目 50-1 (横浜アイランドタワー))
E-mail: ueno.hik-7c7u@jrnt.go.jp

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 デジタルサービス事業本部 情報事業部 統合情報室
(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)
E-mail: yuuji.oosaki@tk.pacific.co.jp

⁵正会員 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 教授
(〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp

現在建設中の北陸新幹線金沢・敦賀間では、路線の1/3にあたる約38.4kmが山岳トンネルで構成されているが、支保パターンや地質区分、変位量等計測結果の豊富な施工データが統一的に得られているという特徴を活かし、山岳トンネル建設における諸課題の解決に役立てたいと考えた。本報告では、課題の一つである「支保パターンにおける当初設計と施工実績との乖離」について、各施工データをそれぞれ整理した「施工実績総括表」に基づき、岩盤(地山)分類別に支保パターンの当初設計/施工実績での採用状況を比較・分析した。

Key Words: shinkansen lines, support patterns, geological classification, construction results

1. はじめに

2021(令和3)年8月現在、北陸新幹線金沢・敦賀間(約125km)では、路線の1/3にあたる約38.4kmがトンネル区間となっており完成・開業に向け着々と建設が進められている。新幹線山岳トンネルはNATMによる掘削を基本としており、各トンネルでは、工事計画のための事前調査、設計、施工法の妥当性評価、施工中の安全性確保のための様々な観測・計測が行われている。これらの観測・計測データの特徴として、以下の2点が挙げられる。

① データの統一性

掘削断面形状がほぼ同等であることに加え、2014(平成26)年から2020(令和2)年のデータを扱っており、

施工法・施工技術も一定のものとなっている。したがって、地質・土被りは異なるものの、統一的にデータを扱う事が可能であり、地質・土被り・支保パターン等のデータ比較・分析に適している。

② 豊富なデータ量

約38.4kmものトンネル延長があり、その全てがNATMによる掘削であることから、地質別・支保パターン別等、豊富なデータから多角的な分析が可能である。

以上の2点の特徴を活かして、観測・計測データを新幹線山岳トンネルの建設における諸課題の解決に役立てたいと考えた。

その課題の一つに、支保の設計と施工との乖離が挙げられる。山岳トンネルの建設では限られた事前調査の情報をを用いてトンネル全体の支保を設計するため、施工中

の観察・計測結果を踏まえて設計を修正することが一般的とされている¹⁾。その結果、当初設計と施工実績に乖離が生まれ、予定していた工期や予算に少なからず影響することがある。

この課題解決に向けては、施工実績の全体像を的確に把握し、新たな山岳トンネル掘削時において正確に反映する必要があるが、各トンネルや建設工区ごとの分析事例はあるものの、データが限定され、他の同様な条件での施工データとの比較がなされてなかった実情がある。そこで本稿では、豊富な施工データが統一的に得られている金沢・敦賀間の新幹線山岳トンネルのデータに基づき、地質別、支保パターン別の当初設計と施工実績の比較・分析をすることとした。

2. 新幹線山岳トンネルのデータ整理

(1) 使用したデータ概要

本稿で使用するデータの基となるトンネルは全部で12本あり、16工区に分割して施工された(表-1)。全12トンネルでは様々な観測・計測が行われているが、ここでは主に「施工実績総括表」のデータを使用する。

「施工実績総括表」は、地質縦断面図の下に事前地質調査結果、支保の当初設計に加え、掘削時の地質、支保パターン、補助工法、変位量といった施工実績をまとめたものである。これまで、新幹線山岳トンネルの建設現場では往々にして、工区、受注者ごとに様式が統一されていなかったことから、新たに整理した。

(2) 岩盤(地山)分類

データ整理にあたっては、スケール、記載内容に加え、「岩盤の工学的分類」(地盤工学会基準 JGS3811)に「未固結」を加えた6種類での地質の再分類、色分けについても見直しを行い、全16工区で比較可能なものとした。表-2に6種類の岩盤(地山)分類を、表-3に新

幹線山岳トンネルにおける標準支保パターンの例を、図-1に施工実績総括表の例(第2鯖江トンネル工区)を、表-4に金沢・敦賀間の岩盤(地山)分類の例を示す。なお、金沢・敦賀間ではSR、SBにあたる地山が存在していなかったため、実質的に4種類のみでの分類となっている。

表-1 金沢・敦賀間トンネル一覧

単位：m

トンネル	トンネル延長	工区名称	工区別延長
加賀トンネル	5,463	加賀(北)	1,763
		加賀(中)	2,350
樋山トンネル	595	加賀(南)	595
			120
指中トンネル	120		
柿原トンネル	2,530	柿原	2,530
第1福井トンネル	80	第2福井(北)	80
第2福井トンネル	3,520		1,603
第1鯖江トンネル	115	第2鯖江	1,917
			115
第2鯖江トンネル	1,515		1,515
武生トンネル	2,460	武生	2,460
脇本トンネル	1,450	脇本	1,450
新北陸トンネル	19,760	新北陸(清水)	2,480
		新北陸(奥野々)	4,880
		新北陸(大桐)	3,605
		新北陸(葉原)	4,495
		新北陸(田尻)	2,170
		新北陸(櫻曲)	2,130
深山トンネル	768	深山	768

表-2 岩盤(地山)分類²⁾を基に作成

大分類	中分類	岩盤分類
硬岩系岩盤(H) 岩石の強さが25MN/㎡以上、 または新鮮な岩石の強さが 25MN/㎡以上	塊状(M) 岩石に顕著な面状/片状の 組織がない	硬岩系塊状岩盤 HM
	葉状(F) 岩石に顕著な面状/片状の 組織がある	硬岩系葉状岩盤 HF
軟岩系岩盤(S) 新鮮な岩石の強さが25MN/㎡ 未満	塊状(M) 構成材料が均質	軟岩系塊状岩盤 SM
	礫質(R) 礫とマトリックスで構成	軟岩系礫質岩盤 SR
	互層(B) 構成材料の異なる岩石が 互層状に積み重なる	軟岩系互層岩盤 SB
		未固結地山 UC

表-3 新幹線山岳トンネルにおける標準支保パターンの例

支保パターン	縦断間隔 (m)	支保部材				備考
		ロックボルト		鋼製支保工	吹付けコンクリート	
		配置	長さ(m)×本数(本)			
IV _{NP}	-	-	-	-	5(平均厚)	標準支保パターン
III _{NP}	2.0	上半	2×5	-	10(平均厚)	標準支保パターン
II _{NP}	1.5	上半	3×10	-	10(平均厚)	標準支保パターン
I _{N-2P}	1.2	上下半	3×10	125H(上半)	12.5(最小厚)	標準支保パターン
I _{N-1P}	1.0	上下半	3×14	125H	15(最小厚)	標準支保パターン
		上下半	3×14	150H	15(最小厚)	標準支保パターン
I _{SP}	1.0	1次インバート	3×4	150H	15(最小厚)	加賀トンネル(北)の例
		上下半	4×14	150H	15(最小厚)	
特S _P	1.0	1次インバート	-	150H	15(最小厚)	
I _{LP}	1.0	上下半	3×12	125H	20(最小厚)	標準支保パターン
特L _P	1.0	上下半	3×0~19※	150H	20(最小厚)	柿原トンネルの例
		1次インバート	-	-	20(最小厚)	

※事前地山改良範囲による

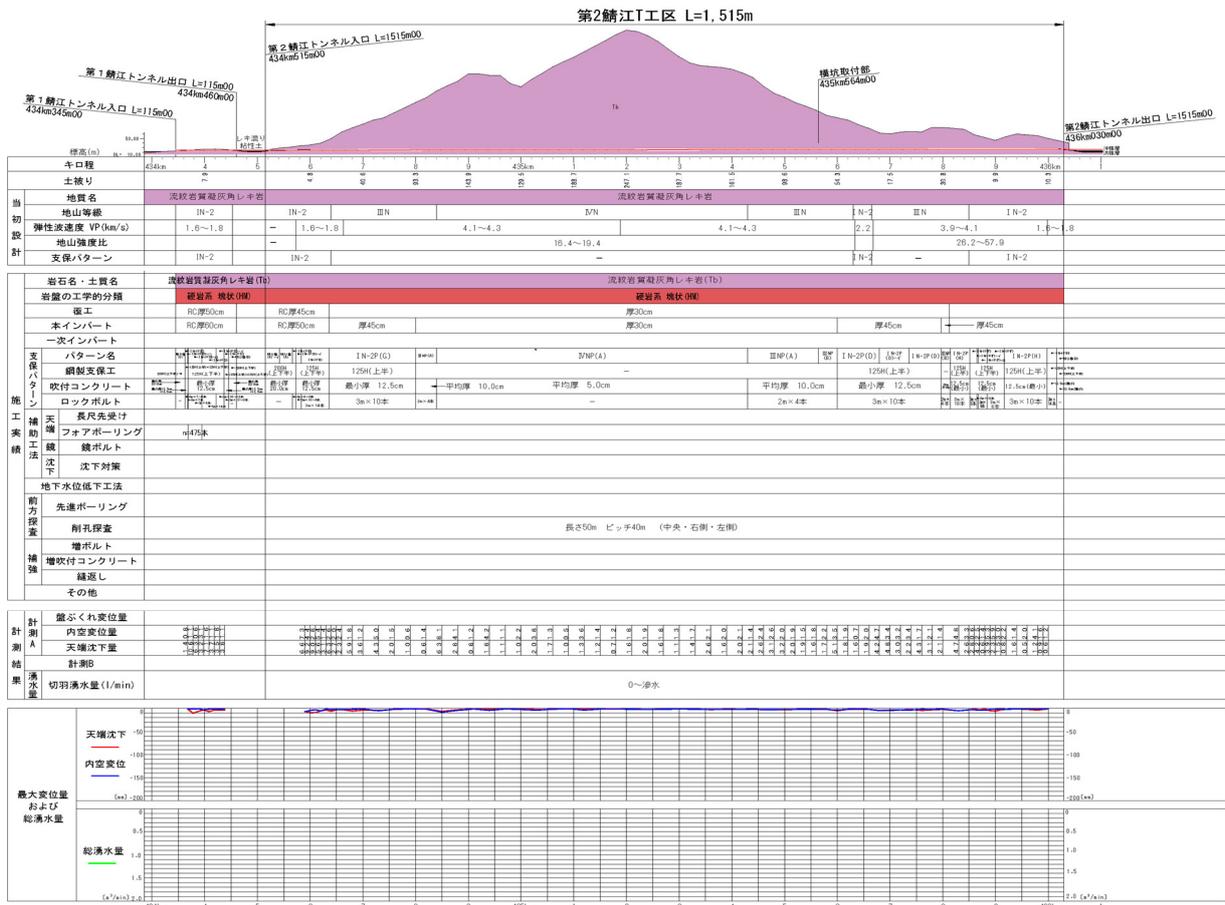


図-1 施工実績総括表の例

表-4 金沢・敦賀間の地質・岩盤分類の例

地質年代	地質		岩盤分類 [※]			
	区分	色・記号	分類	色・記号		
第四紀 完新世	表土、崩積土、崖錐、盛土	AI	未固結堆積物	UC		
	礫	Ag	未固結堆積物			
	砂	S	未固結堆積物			
第四紀 更新世～完新世	粘土・シルト	M	未～半固結堆積物	SM		
	泥岩	MS	軟岩系岩盤 塊状			
凝灰岩	Tf					
砂岩	SS					
新生代 新第三紀	凝灰角礫岩	Tb	硬岩系岩盤 塊状		HM	
	花崗岩	Gr				
	安山岩	An				
	ひん岩	Po				
古第三紀	花崗岩	Gr	硬岩系岩盤	塊状		
中生代	白亜紀	凝灰角礫岩	Tb	硬岩系岩盤	塊状	HM
	ジュラ紀～白亜紀	砂岩	SS	硬岩系岩盤	塊状	HM
		互層～混在岩	Sh	硬岩系岩盤	葉状	HF
		チャート	Ch	硬岩系岩盤		

※岩盤の工学的分類(地盤工学会基準JGS3811)に準拠

3. 施工実績総括表に基づく分析

(1) 岩盤(地山)分類別の掘削延長

まず岩盤(地山)分類別の掘削延長を比較したものを図-2、図-3に示す。図-2は岩盤(地山)分類別の延長を、図-3は全延長に対し岩盤(地山)分類別に各工区が占める割合を示している。特に延長の長い新北陸トンネルが多くを占めているHMが全体の半分(約47%)、次いで新北陸トンネルの一部で見られるHFが約31%となり、加賀トンネル群を構成するSM、柿原トンネルのUCと続いていることが分かる。

(2) 岩盤(地山)分類別の支保パターン延長

岩盤(地山)分類別で採用された支保パターン延長を比較したものを図-4、図-5に示す。

UCでは、ILPが41%、特LPが31%、IN-IPが27%となっている。未固結地山では基本的にはILPを採用することが多いが、一部の砂岩層が安定していた区間(柿原トンネル終点方)ではIN-IPを採用している。

SMでは、IN-IP(インバート対策支保パターンINAIp含む)が70%、特SPが20%を占め、残り10%のうちILPが8%、ISP、特LPがそれぞれ1%を占めている。SMの

区間では膨張性地山が予想されていたことから、当初設計時点よりその多くでインバート対策支保パターンであるINAiPが採用され、不良地山区間でILP、特LP、ISP、特SPが状況に合わせて採用されたと考えられる。また、当初設計で採用されているIN-2P、IINP以下の軽い支保パターンについては結果的にSMの全区間で採用されなかった。

HMでは、IN-1Pが19%と比較的多いものの、残りのほとんどはIVNP～IN-2Pが現地の地山状況により幅広く採用（それぞれ14～17%）されており、顕著な傾向は見られない。その他のISP（11%）は新北陸トンネル（葉原）等で、ILP（6%）は武生トンネルで、特LP（1%）は第2福井トンネル（北）の小土盛り区間で、それぞれ採用されている。

HFでは、IN-2Pが53%を占めており、残り47%のうちIINP、ISPがそれぞれ17%、IN-1Pが13%となっている。当初設計ではIN-2P～IINPで、風化が進んでいる範囲が多い。しかし、データ上では硬岩かつ内空変位量も大きいとは言えない（10mm～20mm程度）にも関わらず、IN-2Pの割合が半分を上回る結果となった。そのため切羽観察記録を確認したところ、地山の強度は確保されているものの、葉状構造により切羽面における割れ目の細かさ、剥離等が卓越していることから、特に上半部の切羽作業の安全性を考慮し、IN-2Pが多く採用されたと考えられる。

また、工区全体を見ると、岩盤（地山）分類別では硬岩に当たるHが約80%を占めている一方、支保パターン別ではIN-2Pの採用が32%で最も多く、次いでIN-1P、

IINPがそれぞれ17%となっている。これは前述のとおり、全体の約30%を占めるHFを中心にIN-2Pの採用が多かったことが要因のひとつと考えられるが、HM、HFで採用したIN-1P、IN-2Pの割合が合わせて約50%となっており、風化、湧水等、掘削時の地山状況や、切羽作業における安全性確保を優先した支保選定が影響していると考えられる。

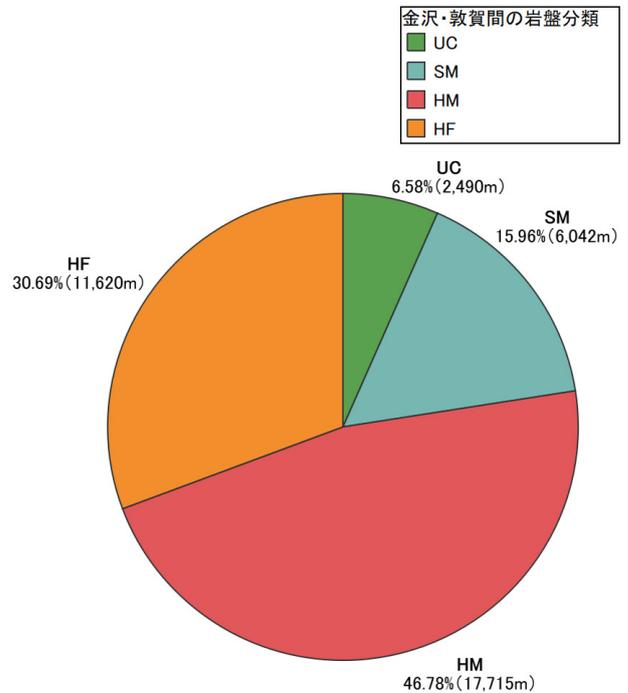


図-2 岩盤分類別の掘削延長

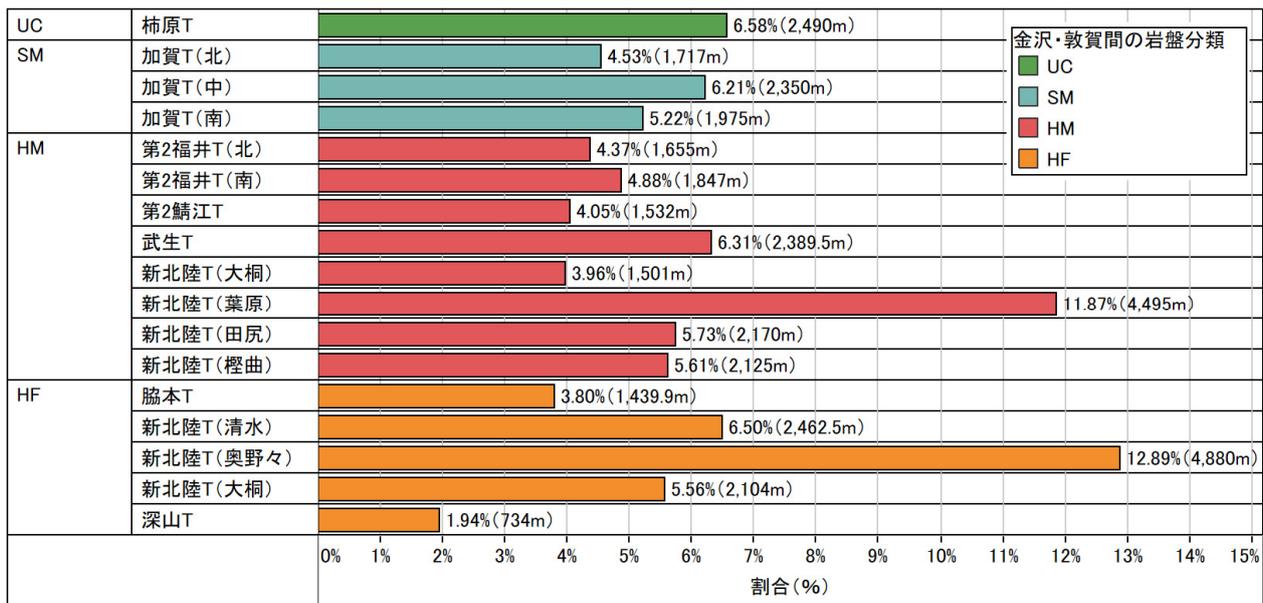


図-3 全延長に占める各工区掘削延長

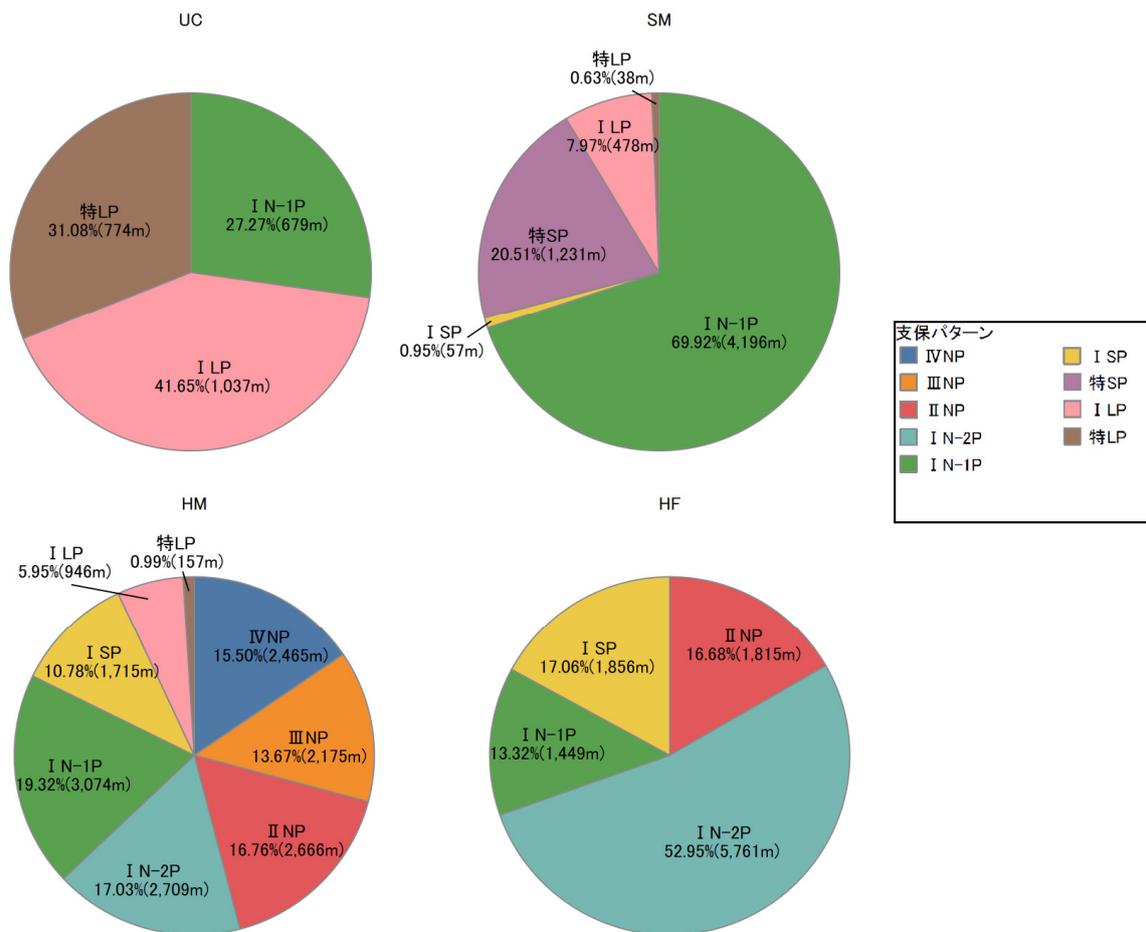


図-4 岩盤分類別の支保パターン延長

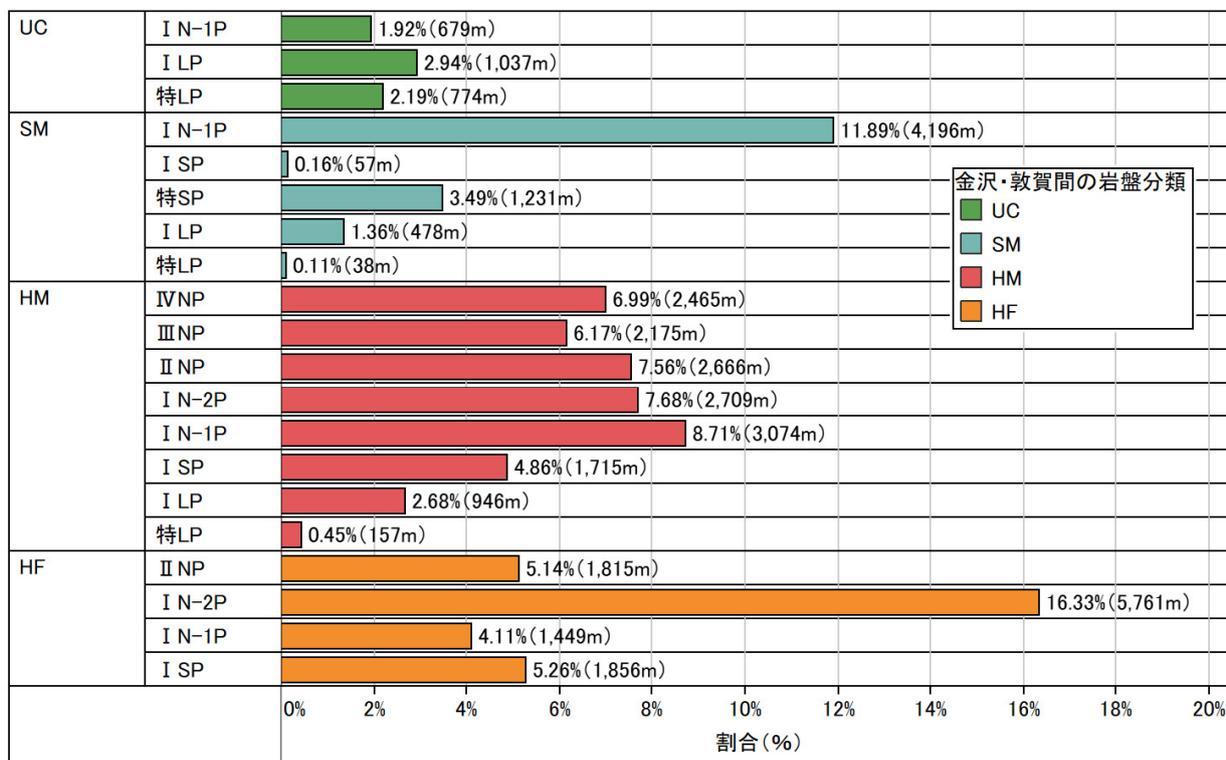


図-5 全延長に占める支保パターン延長

(3) 当初設計と施工実績の支保パターン延長の比較

当初設計の支保パターンと施工実績の支保パターンとを延長で比較したものを図-6に示す。図-6左の表は当初設計の各支保パターンの延長と、当初支保パターンから「ランク DOWN」（「重い」→「軽い」）または「ランク UP」（「軽い」→「重い」）の何れかに変更した施工実績の支保パターン延長別の割合を示している。図-6右のヒストグラムは変更した施工実績の支保パターンについて岩盤分類別の内訳を示している。なお、支保パターンのランク付けは表-3に基づいて「軽い」→「重い」順に、IVNP→IIINP→IINP→IN-2P→IN-1P→ISP/ILP→特SP/特LPの7段階としている。

全体の傾向としては、当初設計から「変更なし」が約34%で、「ランク DOWN」したものが約15%、「ランク UP」したものが約51%と、「ランク UP」した区間が多い結果となっている。なお、当初設計の支保パターン別に「ランク UP」の割合を見てみると、IVNP（約89%）、IIINP（約75%）、IINP（約72%）のように鋼製支保工のない支保パターンにおいては「ランク UP」の割合が非常に高い一方、鋼製支保工のある支保パターンではIN-2P（約31%）、IN-1P（約35%）、ILP（約4%）のように「ランク UP」の割合が低くなっている。また「変更なし」も鋼製支保工の有無で当初からの比率が大きく異なる。

岩盤（地山）分類別で見ると、UCは当初からIN-1Pよ

りも「重い」支保パターンのみで、いずれも「ランク DOWN」はない。SMでは、当初設計でIINP～ILPとなっているものの、前述のようにほとんどがIN-1Pに変更されている。HMの場合、IVNP～IN-2Pにおいて、各支保パターンでの「変更なし」と比べて「ランク UP」の割合が大きくなっている、HFもSMのように、ほとんどがIN-2Pに変更されている。

山岳トンネルでは、『当初の設計は一般に安全側の設計となることが多い』が、今回の結果は前述のとおり、支保が重くなる「ランク UP」した区間の方が多い。この要因として当初設計では、過去の資料や地表面踏査、ボーリング調査、物理探査等の限られた方法、範囲での調査結果を基に、おおよその岩種、弾性波速度から支保パターンを設定しているが、断層破碎帯や湧水、特殊地山等の諸条件を正確に当初設計に反映するには限界があることが挙げられる。そのため多くの区間で、地質等の条件によっては結果として「軽い」支保パターンでの当初設計となり、支保パターンの「ランク UP」に繋がったのではないかと考えられる。また、新幹線山岳トンネルは設計掘削断面の地山変形等による断面内余裕を50mmとする経済設計を行っており、完成・開業に向けた工程に猶予のない状況において、縫い返し等の工程面でのリスク低減を目的とした支保選定となっていることも一つの要因と考えられる。

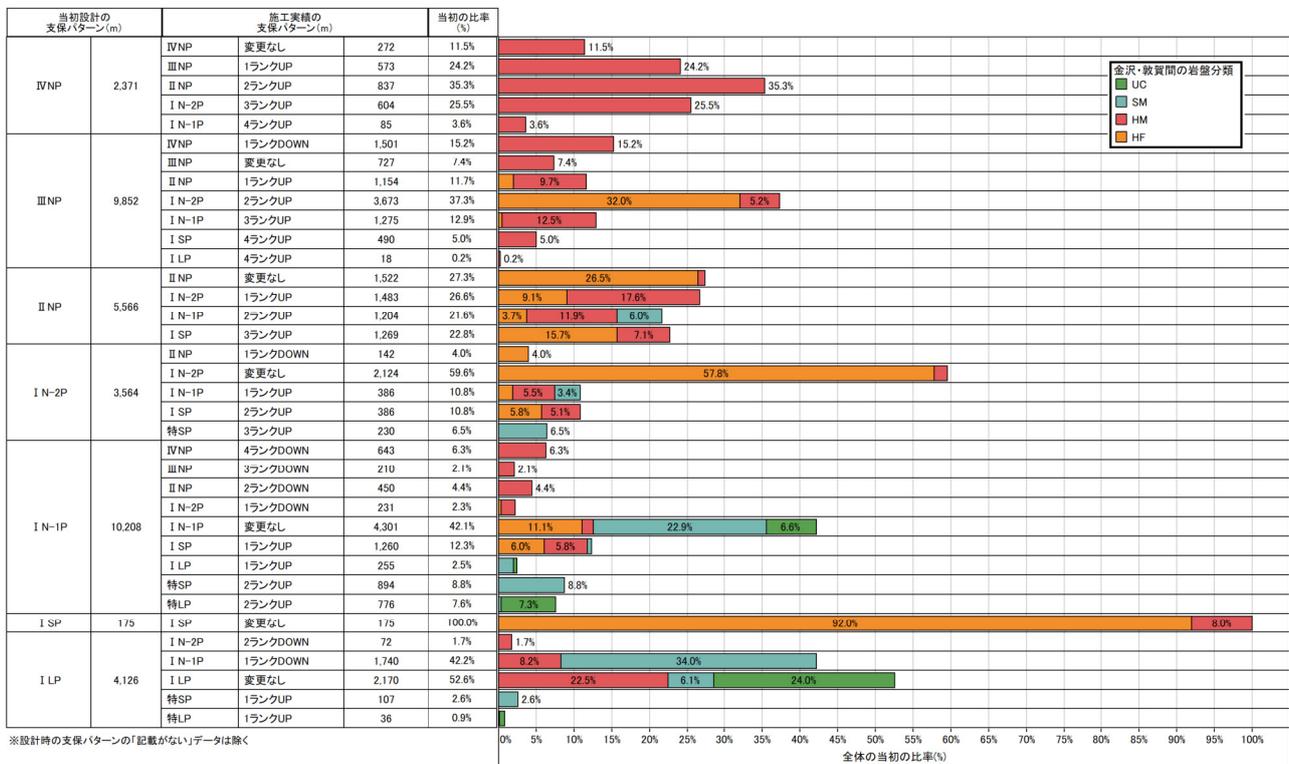


図-6 当初設計と施工実績の支保パターン延長

4. おわりに

本稿では、新幹線山岳トンネルの施工データが統一された「施工実績総括表」に着目し、支保パターンの採用状況、岩盤（地山）分類別の当初設計と施工実績の支保パターン延長について、データの整理・分析を行った。明らかとなった主たるものは以下のとおりである。

- ・岩盤（地山）分類別の支保パターンを分析した結果、硬岩系岩盤（葉状）では、割れ目の細かさ、剥離等が卓越しているため、支保選定にあたっては地山強度以上に切羽作業の安全性が影響し、比較的‘重い’支保を用いている可能性が高い。
- ・当初設計と施工実績の支保パターンを分析した結果、当初支保パターンから「ランク UP」し、全体的に‘重い’支保を採用する傾向が明らかとなった。主たる要因は、限定された事前調査に基づいて当初設計をせざるを得ない山岳トンネルの制約条件によるものと考えられる。

なお、「施工実績総括表」には支保パターンだけでなく、内空変位量、天端沈下量、補助工法、湧水量、等々

の施工データが整理されており、切羽観察記録を含め非常に有益なデータである。今後は、データの拡充を目指し、現在建設中の北海道新幹線、九州新幹線のトンネル観測・計測データを加えるとともに、支保の設計と施工との乖離という課題解決に向け、得られたデータを基に、更なる分析・検討を進めていきたい。

謝辞：北陸新幹線金沢・敦賀間全 12 トンネルの施工にあたっては、北陸新幹線金沢・敦賀間トンネル施工技術委員会（委員長：朝倉俊弘京都大学名誉教授）の委員各位に様々な助言を賜った結果、無事貫通を迎えることができた。ここに改めて御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 鉄道・運輸機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp.45-46，2017.
- 2) 地盤工学会：地盤工学会基準（案）岩盤の工学的分類方法，2011.

(2021. 8. 6 受付)

A STUDY ON THE CONSTRUCTION RESULTS OF TUNNEL SUPPORT PATTERNS FOR SHINKANSEN MOUNTAIN TUNNEL FROM KANAZAWA TO TSURUGA

Ryo KASHIWAGI, Yutaro GOTO, Hikaru UENO, Yuji OSAKI and Kiyoshi KISHIDA

On Hokuriku Shinkansen from Kanazawa to Tsuruga under construction, about 38.4km equal to 1/3 of the line consist of the mountains tunnel. The measurement data (support patterns, geological classification, displacement, etc.) on this construction have advantages in unity and abundance, so we thought that those data are useful for solving some problems in the mountains tunnel construction. In this report, to difference between the original design and construction results of support patterns, which is one of the problems, we compared to and analyzed adoption rate of the original design and construction results of support patterns according to geological classification, based on the "summary table of construction results" organized construction data.