

若材齢における強度・剛性が大きな瞬結吹付けコンクリートの開発と活用

熊坂 博夫 石井 卓 栗田 守朗 中谷 篤史 垣見 康介 松尾 勝司
(技術研究所) (技術研究所) (土木技術本部) (技術研究所) (土木技術本部) (北海道支店)

Development and utilization of shotcrete with high early strength and stiffness

by Hiroo Kumasaka, Takashi Ishii, Morio Kurita, Atushi Nakaya, Kousuke Kakimi
and Masashi Matuo

Abstract

Quick-setting shotcrete is shotcrete that develops higher early strength and stiffness than conventional shotcrete. Quick-setting shotcrete has been used widely as primary supports for mountain tunnels, such as road tunnels, to be driven through squeezing ground often encountered deep in the ground or at weak ground sites. Quick-setting shotcrete was developed jointly with Denki Kagaku Kogyo Kabushiki Kaisha with the aim of using it as support members to make it possible to construct high-level radioactive waste disposal facilities at deeper levels in the ground. When it was developed, quick-setting shotcrete was referred to as "quick-setting high-stiffness shotcrete." Later, its mix proportions were modified to meet the performance requirements (strength development properties) for supports of mountain tunnels, such as road tunnels, to be driven through squeezing ground. The shotcrete thus developed is now called "quick-setting shotcrete." This paper briefly explains how quick-setting shotcrete and quick-setting high-stiffness concrete were developed, describes their specifications and performance and reports on real construction works that show the usefulness of the newly developed material.

概要

瞬結吹付けコンクリートは、吹付け後の若材齢時に既往の高強度吹付けコンクリートよりも高い強度と剛性を得ることができる吹付けコンクリートである。この吹付けコンクリートは、道路などの山岳トンネルにおいて、大深度あるいは地山のもつ強度が小さい場合に、掘削に伴う地山の押し出し性の強い地質条件下で一次支保に用いられている。

当初は、高レベル放射性廃棄物の処分施設をより深い位置に立地可能とするための支保部材として利用することを目指して電気化学工業株式会社と共同開発を実施した。開発時には、この吹付けコンクリートを「短時間高剛性吹付けコンクリート」と呼んでいた。その後、道路等の山岳トンネルへの活用を図るため、地山の押し出し性の強い山岳トンネルの要求性能(支保の強度発現特性)に合わせた配合とし、これを「瞬結吹付けコンクリート」と呼ぶこととした。

本報では瞬結吹付けと短時間高剛性吹付けコンクリートをあわせて「瞬結吹付けコンクリート」と呼ぶこととし、その開発概要と仕様・性能について述べるとともに、瞬結吹付けコンクリートの有効性を示す施工事例について報告する。

§1.はじめに

大深度で高地圧あるいは地山のもつ強度が小さい場合、地山強度比が小さい地質条件においてトンネルを建設するには、最終的なトンネルの安定性を確保することに加えて、掘削直後の切羽の安定性を確保することも重要となる。

山岳トンネルの標準工法(日本に導入された当時は

NATM(New Austrian Tunneling Method)と呼ばれた)の一次支保は、吹付けコンクリート、鋼製支保工およびロックボルトが主要な支保部材である。これらは、掘削に伴って生じるトンネル周辺地山の応力再配分過程において、周辺地山の支保機能を十分に発揮させ、トンネル構造体(支保部材と周辺地山が一体となって構成される構造体)としての安定化を図るために用いられる。以下に、山岳トンネルにおける標準的な吹付

けコンクリートについて説明する。

吹付けコンクリート¹⁾は、点あるいは線状に支保するロックボルトや鋼製支保工と比べて、吹付けコンクリートはトンネル壁面に面的に密着して設置される部材である。掘削後ただちに施工が可能で、掘削断面の大きさや形状に左右されず施工できることから、山岳トンネルの主要な支保部材として一般的に用いられている。

また、吹付けコンクリートとは²⁾、圧縮空気や機械力によって吹き付けられたコンクリートで、トンネルでは多くの場合、支保工として用いられる。吹付け方式としては、主要な材料をミキサーで水とともに練り上げノズルまで送って急結剤を添加して吹き付ける湿式方式が大半であるが、乾式や半乾式といわれる方式も利用されている。

吹付けコンクリートの配合と施工方法を決定する場合には、力学的機能として吹付け後の初期から長期に適宜必要な強度を得られることが留意点の一つとなっている。

吹付けコンクリートの(設計基準)強度は³⁾、トンネルの機能、断面形状等の構造条件、荷重条件によって異なり、これまでは、「標準設計の適用(地山条件による標準支保パターンの適用)」に基づく圧縮強度である材齢 28 日の(設計基準)強度を 18N/mm²程度とする場合が多かった。

近年では、材料、配合および施工機械の技術発達により、吹付けコンクリートの高強度化が可能となり、構造物の要求性能に応じた吹付けコンクリートの強度を選定することができるようになってきている。例えば、第二東名・名神高速道路トンネルのように従来よりも扁平で大断面のトンネルでは、材齢 28 日の圧縮強度で 36 N/mm²の設計基準強度の吹付けコンクリートが採用されている。この吹付けコンクリートは「高強度吹付けコンクリート」と呼ばれている。

また、押し出し性の強い地山への対策として、吹付け直後の掘削に対して早期閉合を行い安定性を確保する方法が用いられようになってきており、吹付け直後の吹付けコンクリートにおいて高強度(および、それに伴う高剛性)が得られる新たな吹付けコンクリートの開発が進められている。

著者らは上述の観点から電気化学工業株式会社との吹付けコンクリートの共同開発を実施した。本報では、吹付け直後の若材齢における強度・剛性の発現性の高い吹付けコンクリートの開発の背景、動機や本吹付けコンクリートの力学特性について紹介するとともに、現場適用事例から瞬結吹付けコンクリートの有効性について報告する。

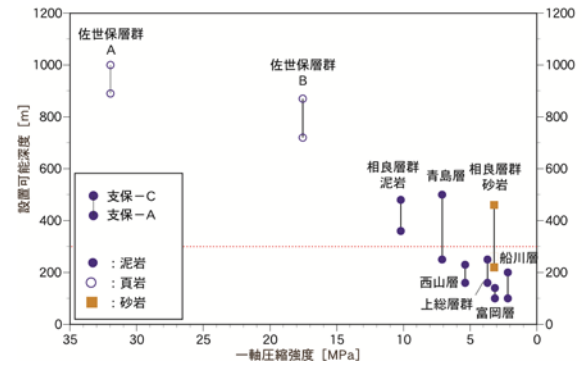


図-1 設置可能深度と一軸圧縮強度との関係

§2.開発の背景と目標性能

2.1 開発の背景と動機

著者らの幾人かは、高レベル放射性廃棄物の地下施設の安定設計に係わる検討を実施している。その検討において、わが国の軟質堆積岩を対象に、三軸圧縮試験結果等を有する岩盤物性データセットを用いた安定解析検討を実施し、その結果を報告している。その岩盤の一軸圧縮強度と地下施設の設置可能深度の関係を図-1に示す⁴⁾。なお、この検討では地下施設は直径 5mの円形断面の坑道とし、支保aは吹付コンクリートを厚さ 10cm、設計圧縮強度：40 N/mm²とし、支保bは高剛性コンクリートセグメントの厚さ 15cm、設計圧縮強度：54 N/mm²としている。

高レベル放射性廃棄物の処分に係る法律「特定放射性廃棄物処分の最終処分に関する法律(最終処分法)」では、地下 300m 以深の地層中に処分することが定められているが、図に示されるように、軟質な堆積岩では、深度 300m 以深への設置が難しい結果となっていることが分かる。そのため、軟質な堆積岩において設置深度を 300m 以深に改善できる吹付けコンクリートを目指して開発することとした。

さらに、類似の軟質岩の立地条件の道路等の山岳トンネルの場合にも広く展開・活用できる吹付けコンクリートとなることを期待し、実トンネル工事における吹付け試験を実施した。

2.2 目標性能の設定

軟質な堆積岩における地下処分施設の設置可能深度を向上するためには以下のような方法が考えられた。

- ①剛性の高い支保部材(例えば鋼製セグメント支保や高強度コンクリートセグメントなど)をできるだけ切羽に近い位置に設置し、掘削によるトンネル周辺地山の変形を抑止し安定性を確保する方法

表-1 高強度吹付けコンクリートと瞬結吹付けコンクリートの強度特性と配合例⁷⁾

吹付け コンクリート名	3時間 発現強度 (N/mm ²)	目標 スランプ (cm)	水セメント 比 W/C	細骨材率 s/a	単位量(kg/m ³)						急結剤 C _x (%)	備考
					水 W	セメント C	混和材 Σ	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 SP		
高強度吹付け コンクリート	2	10	45	62	202	450 (普通ポルトランド)	-	1079	672	1.40	8 (Type-10)	栗子T
瞬結吹付け コンクリート	8	23	45	62	203	450 (普通ポルトランド)	54	972	607	6.53	12 (Type-10S)	栗子T
	6.6	22~24	40	63	190	475 (普通ポルトランド)	57	1027	596	7.13	12 (Type-10S)	穂別T
	18	20~25	28.5	60	185	550 (早強セメント)	100	943	641	22.0	12 (Type-10S)	第2魚津T

②吹付けコンクリートの強度・剛性が十分得られるよう切羽の進行速度を遅くする方法

③短時間で高強度・高剛性を発現する吹付けコンクリートを採用する方法

高レベル放射性廃棄物の地下施設が総延長 200km から 250km の長大なトンネル群となることから、①のような支保部材の重厚化は経済性の面から避けることが望ましい。また、トンネル建設(掘進速度)の高速化の妨げになる②の方法も望ましくはない。このため、③の短時間で高い強度・剛性が得られる吹付けコンクリートを活用することが有効であると考えた。

目標性能については以下のように考えて設定した。支保効果を発揮するには、地山の押し出しによる変形が支保工に作用し、支保反力すなわち支保効果を増大させる。このため、支保部材が高い剛性を有していなければ十分な支保反力・支保効果は生じない。

一般的に、切羽がトンネル径 (D)に相当する距離 (1D)まで掘進すると地圧率は 100%近くまで解放される。このため、トンネル径(D)が 5m の場合には、吹付け後に、切羽が 5m 掘進した後において、支保反力・支保効果はもはやそれ以上増加しない。したがって、支保効果を発揮するためには、掘削がトンネル径の 1/2 程度進んだ時点で、支保の剛性が大きくなっていることが必要となる。単純な計算では、掘進速度が 10m/日程度的高速掘進を目指す場合を想定すると 1/4 日(約 6 時間)以内に高い剛性(15~20kN/mm²)を發揮する必要がある。

このような考えから、普通吹付けコンクリートに求められる 28 日強度相当の設計基準強度を 3 時間で得られる吹付けコンクリートを目標性能として開発することにした。

また、道路などの一般の山岳トンネルで、押し出し性が強い場合に利用することを想定した「瞬結吹付けコンクリート」は、既往の第二東名・名神高速道路トンネルのような大断面トンネルで用いられている高強

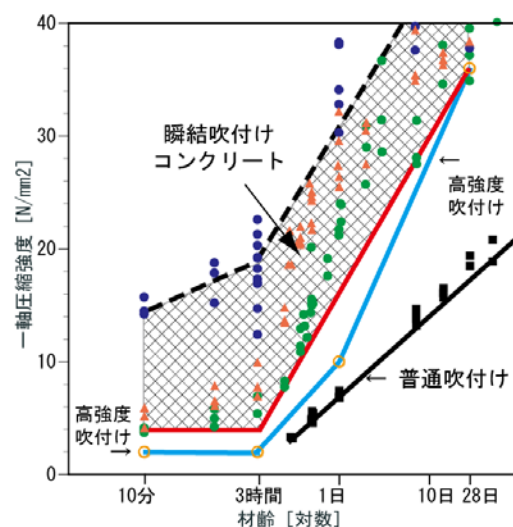


図-2 普通吹付け、高強度吹付け、瞬結吹付けコンクリートの材齢と強度発現性状⁴⁾

度吹付けコンクリートの初期強度 3 時間で 2N/mm²に対して、明瞭に早期の支保効果を得ることを考えて初期強度 3 時間で高強度吹付けコンクリート 2 倍以上の圧縮強度が得られることを目標性能としている。なお、材齢 28 日の設計基準強度は高強度吹付けコンクリート 36N/mm²の吹付けコンクリートとした。

高強度吹付けコンクリート、瞬結吹付けコンクリートの強度特性と配合の例を表-1 に示す。

表に示されるように、瞬結吹付けコンクリートは、混和材「デンカΣショット SH」と急結剤「デンカナトミック TYPE-10S」を用いている。ここで、混和材「デンカΣショット SH」は、新たに共同開発した材料である。

普通吹付けコンクリート、高強度吹付けコンクリート、瞬結吹付けコンクリートの材齢と強度発現性状を図-2 に示す。図中のプロット(○、△、□)は、北陸新幹線 第 2 魚津トンネル、三遠南信自動車道 三遠トンネル、北海道横断自動車道 穂別トンネルおよび東北中

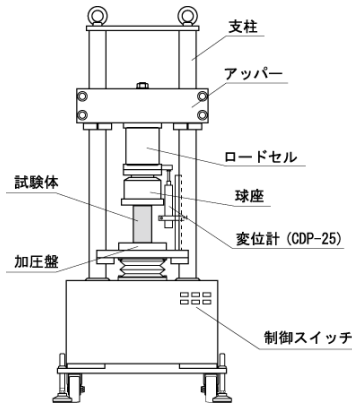


図-3 小型載荷試験装置の概要図⁶⁾

中央自動車道 栗子トンネルで実施した吹付け試験(強度試験)結果を示している。同図に示した各種の吹付けコンクリートは、混和材と急結剤の種類と配合に違いがある。瞬結吹付けコンクリートは、混和材「デンカΣショットSH」と急結剤「デンカナトミックTYPE-10S」を用いたセメント量とその種類による配合の違いであり、配合により強度発現性状は図-2に示すメッシュの広い領域で強度を調整することができる。

§3.吹付けコンクリートの吹付け試験と力学的な特徴

掘削時のトンネルの安定性の評価や設計においては、吹付けコンクリートの若材齢時のピーク強度や応力～ひずみ関係などの力学特性を把握することは重要である。このために、現場において試験が可能な小型載荷試験装置を作製し、トンネル切羽における箱吹きブロックやトンネル壁面への吹付けコンクリートから供試体を採取し、この小型載荷試験装置を用いた一軸圧縮試験を実施した。本章では、試験方法及び瞬結吹付けコンクリートの若材齢時の応力～ひずみ関係や材齢と強度、剛性の関係について示す。

3.1 吹付けコンクリートの若材齢時の力学試験

吹付け直後の10分から1日程度までの若材齢時の力学試験として以下の試験方法がある。

- ①引抜き法による初期強度試験方法(プルアウト試験：JSCE-G 561-2005)
- ②ピン貫入試験
- ③JIS 載荷試験(JISA 1108 に準拠した一軸圧縮試験：荷重制御)

表-2 小型載荷試験装置の仕様⁶⁾

供試体寸法(mm)	φ50×h100
載荷方式	サーボモーター スクリージャック式 (変位制御)
最大荷重(kN)	150
載荷速度(mm/min)	0.033～16.67
重量(kg)	約125
その他	レベラー付キャスター

④定ひずみ載荷試験(小型載荷試験装置を用いた一軸圧縮試験：定ひずみ載荷)

①、②は円柱供試体を採取できない様な吹付け直後から材齢1日程度(一軸圧縮強度20N/mm²程度)までの材料の強度を把握するために用いられる。③、④では円柱供試体を作製可能な材齢に対して一軸載荷試験が行われる。著者らは主に①と③、④を併用して吹付けコンクリートの若材齢の力学試験を実施した。特に、ピーク強度以降までの応力～ひずみ関係を得るために④を実施している。

3.2 小型載荷試験装置

吹付け直後の若材齢での載荷試験による強度試験やピーク強度以降の力学特性を把握することを目的として、現場において定ひずみ載荷条件で行える試験装置を作製した。本開発のために作製した小型載荷試験装置と装置の仕様を図-3と表-2に示す。

なお、小型載荷試験装置と既往の載荷試験装置(MTS社製)を用いて、同一載荷条件で試験を実施し、小型載荷試験装置で得られる物性値の載荷方法による影響とJIS規格の試験方法で得られる物性値との比較を実施している。これらより、試験装置や載荷条件によって、弾性係数や破壊ひずみに違いがないことを確認している。

3.3 ひずみの計測方法について

軸ひずみ計測は以下の計測方法により相違がある。

- ①ひずみゲージによる測定
- ②コンプレッソメータタイプによる測定
- ③装置の変位計

弾性係数は①と②ではほぼ同じ値となり、③を用いた弾性係数は①、②を用いた場合よりも小さな値となることがわかった。

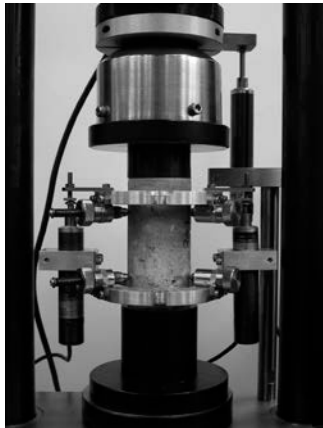


写真-1 供試体の軸ひずみ計測機器の設置状況⁶⁾

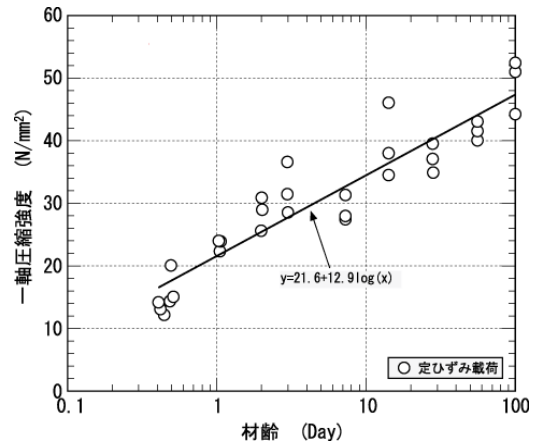


図-6 材齢と一軸圧縮強度の関係 (定ひずみ載荷)⁹⁾

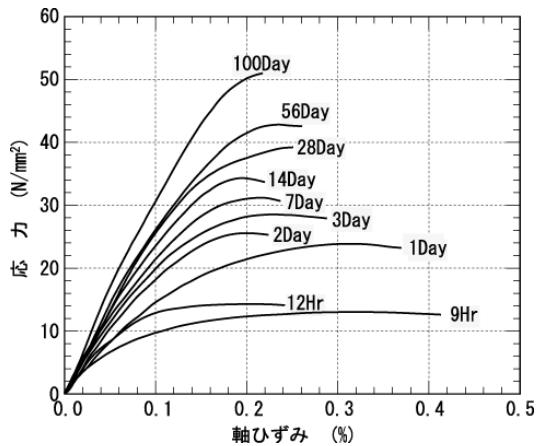


図-4 コンプレッソメータによる応力～ひずみ関係⁹⁾

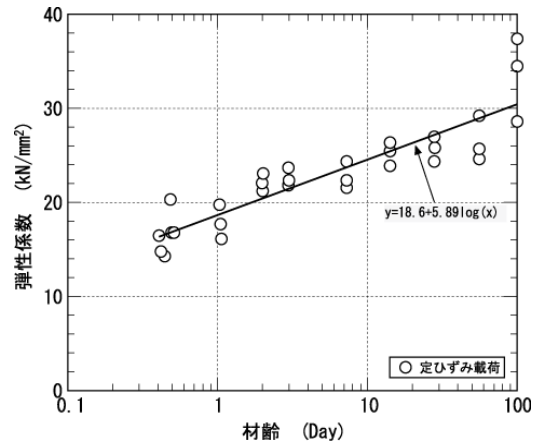


図-7 材齢と弾性係数の関係 (定ひずみ載荷)⁹⁾

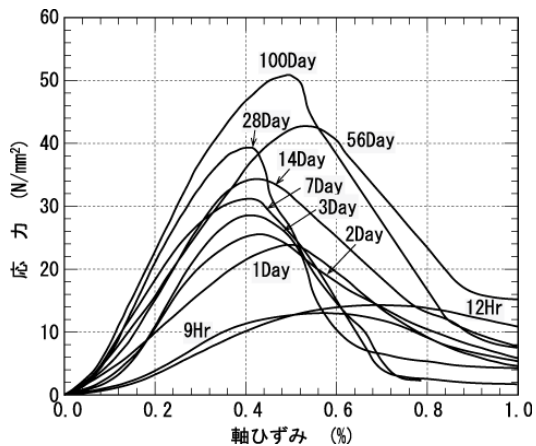


図-5 荷装置の変位計による応力～ひずみ関係⁹⁾

以上より、②と③を併用して荷試験を行い、若材齢の吹付けコンクリートの応力～ひずみ特性を求めることとした。なお、ピーク強度以降の応力～ひずみ特

性は③を用いて計測した。

軸ひずみ計測機器の設置状況を写真-1に示す。

3.4 試験結果例

後章の現場適用事例で述べる穂別トンネルで実施した瞬結吹付けコンクリートの強度試験結果を示す。

コンプレッソメータタイプと荷装置の変位計による各材齢における代表的な応力～ひずみ関係を図-4、図-5に示す。コンプレッソメータタイプは供試体に治具を付けて変位を計測するため、変形の小さなピーク強度までの計測が可能である。図-5より、若材齢時における応力～ひずみ特性は、ピーク強度以降において脆性的な破壊現象を生じず、応力は緩やかに減少し、高いじん性を持つ特性を示すことがわかる。

定ひずみ載荷試験から得られた材齢と一軸圧縮強度の関係を図-6に、材齢と弾性係数の関係を図-7に示す。弾性係数は、コンプレッソメータタイプによる変位計測結果(図-4)より JISA 1149 に準拠して算定

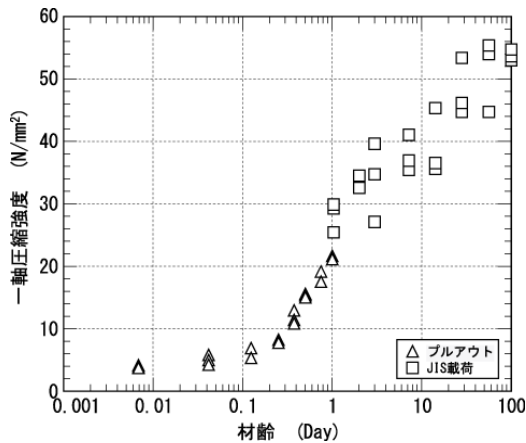


図-8 材齢と一軸圧縮強度の関係
(プルアウト試験, JIS 載荷試験)⁹⁾

した。これらの図より、これまで試験を実施したトンネルにおける試験結果と同様に、強度および弾性係数は材齢とともに増加し、その関係は材齢を対数軸にした直線関係となることがわかる。

プルアウト試験と JIS 載荷試験から得られた材齢と一軸圧縮強度の関係を図-8 に示す。ここに、プルアウト試験による圧縮強度は、引抜き圧力に係数を乗じた換算値である。

図に示されるように、瞬結吹付けコンクリートの強度発現性状は、材齢 10 分(0.007Day)で 3.9N/mm²、材齢 6 時間(0.25Day)で 8.1N/mm²と高強度吹付けコンクリートの約 2 倍の強度が得られるが、吹き付け直後から材齢 6 時間(0.25Day)までは強度は微増であるが、材齢 6 時間(0.25Day)以降に急激な強度増加を示し、材齢 1 日(1 day)で 21.5N/mm² となった。また、JIS 載荷試験の結果より材齢 1 日(1 Day)以降も、材齢とともに強度発現が進んでいることがわかる。

§4.現場適用事例

瞬結吹付けコンクリートの適用案件第 1 号の北海道横断自動車道 穂別トンネルは、地質条件が悪く、掘削に伴い大きな押し出し性の変状が発生した。本章では、この吹付けコンクリートを活用することで、支保の軽減(省略)と施工の高速化に役立ち、工期短縮に効果を発揮したことを報告する。

4.1 工事概要

穂別トンネルは北海道の中央部に位置し、道東自動車道における未開通であった夕張 IC と占冠 IC 間を結ぶ路線の一部となる高速道路トンネルである。



図-9 穂別トンネルの位置図¹¹⁾

[凡例(開通区間、整備区間などは文献¹¹⁾発表当時]

穂別トンネル東工事は、坑口より 1,600m 以奥に出現した土被り 200m を超える蛇紋岩区間において、計測結果に基づくトンネルの安定化対策と瞬結吹付けコンクリートを活用した高速施工により、脆弱地山区間を工期内で施工することができた。

4.2 地形・地質概要

施工区間は日高造山帯に属する標高 700~800m の山岳地帯で、付近一帯は急峻な山岳地形を成している。トンネルの最大土被りは約 380m である。

地質は中生代白亜紀中部蝦夷層群の泥岩・蛇紋岩、中生代ジュラ紀から白亜紀のハッタオマナイ層、新第三紀中新世滝の上層の泥岩卓越層が分布する。坑口より 1,600m 以奥のトンネル中央付近の特殊地質区間には、脆弱で自立度の低い蛇紋岩が多く介在する。この特殊地質区間の蛇紋岩は地山強度比は 0.2~0.5 であり、大きな塑性地圧が発生するため、難工事となる事例が多い。特に粘土状蛇紋岩と葉片状蛇紋岩では穂別トンネルにおいても実際に大きな塑性地圧が発生した。なお、近隣の当社施工事例の国道 274 号 稲里トンネルや道道夕張新得線 赤岩トンネルにおいても、大きな塑性変形が発生している。

4.3 脆弱地山区間の施工

本坑掘削が脆弱地山区間に到達するに当たり、先行する避難坑の掘削実績と脆弱地山区間到達時の支保パターンにおける実績を踏まえ、計測結果などをフィードバックしながら施工を行った。しかし、トンネル構造は不安定となり崩壊する区間も生じた。

表-3 支保パターンの比較¹²⁾

		当初支保パターン	瞬結吹付けコンクリート支保パターン
掘削工法		補助ベンチ付全断面	補助ベンチ付全断面
閉合距離		12m	12m
一次支保	吹付け	高強度 t=30cm	瞬結 t=30cm
	支保工	HH-201@1.0m	HH-201@1.0m
	ロックボルト	L=4m×24本	L=4m×20本
二次支保	吹付け	高強度 t=25cm	アーチ部：瞬結 t=15cm インバート部：瞬結 t=20cm
	支保工	HH-154@1.0m	なし

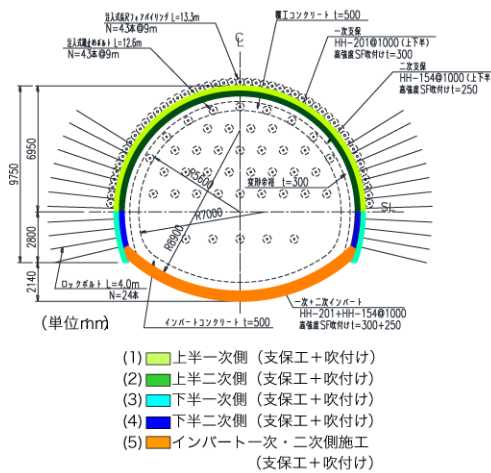


図-10 当初支保パターンと施工方法¹²⁾

このため、トンネルの安定化対策を実施しながら施工を進めることとなった。吹付けコンクリートと鋼製支保工の一次支保工に加えて、さらに二次支保工として吹付けコンクリートと鋼製支保工を構築する対策工は有効であったが、この施工(以下、「当初の二重支保パターン」と呼ぶ)を継続すると、掘進速度が遅く掘削終了工期が厳しくなったため、工期短縮を図るための以下に示すような支保の軽減と断面の早期閉合によるトンネルの安定化を両立させた高速化施工を採用している。

- ① 結吹付けコンクリートを用いて一次支保の剛性を高め、断面閉合までの間一次支保状態で支持
- ② 結吹付けコンクリートを用いて二次支保の剛性を高める一方、二次側の鋼製支保工を省略
- ③ 断面の早期閉合を優先(時間的に早める)
- ④ 断面閉合時にインバートストラットとアーチ部の二次側の吹付けコンクリートを同時施工
- ⑤ アーチ部のロックボルトを省略し打設範囲限定

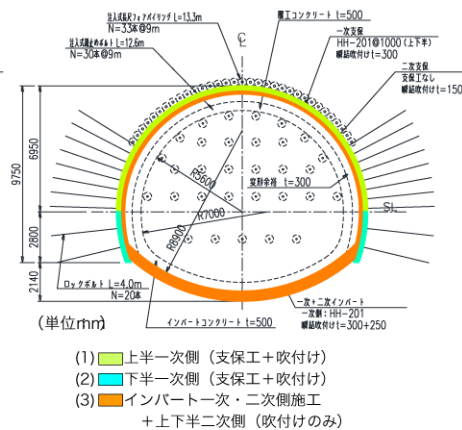


図-11 瞬結吹付けコンクリートを採用した支保パターンと施工方法¹²⁾

当初の二重支保パターンと瞬結吹付けコンクリートを用いた支保パターンとの比較を表-3と図-10、図-11に示す。

4.4 脆弱地山区間における瞬結吹付けコンクリートを用いた支保パターンの効果

高強度吹付けコンクリートと瞬結吹付けコンクリートに発生する応力の比較を図-12に、当初支保パターンと瞬結吹付けコンクリートを採用した支保パターンに生じた変位(天端沈下・内空変位)の経時変化を図-13に示す。

図-12に示されるように、高強度吹付けコンクリートの軸力分担率は30%程度であるのに対し、瞬結吹付けコンクリートは60%以上と約2倍となり、瞬結吹付けコンクリートの支保効果は軸力分担率で顕著となった。これに伴い、鋼製支保工の負担する軸力も半減した。

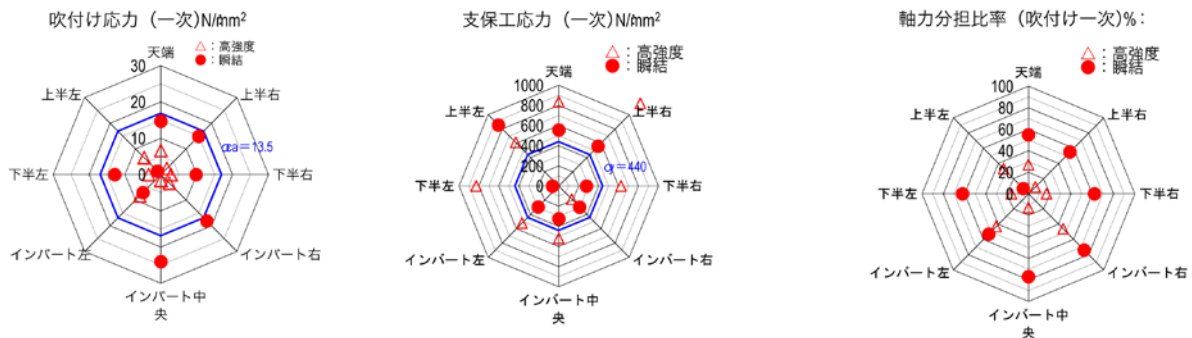
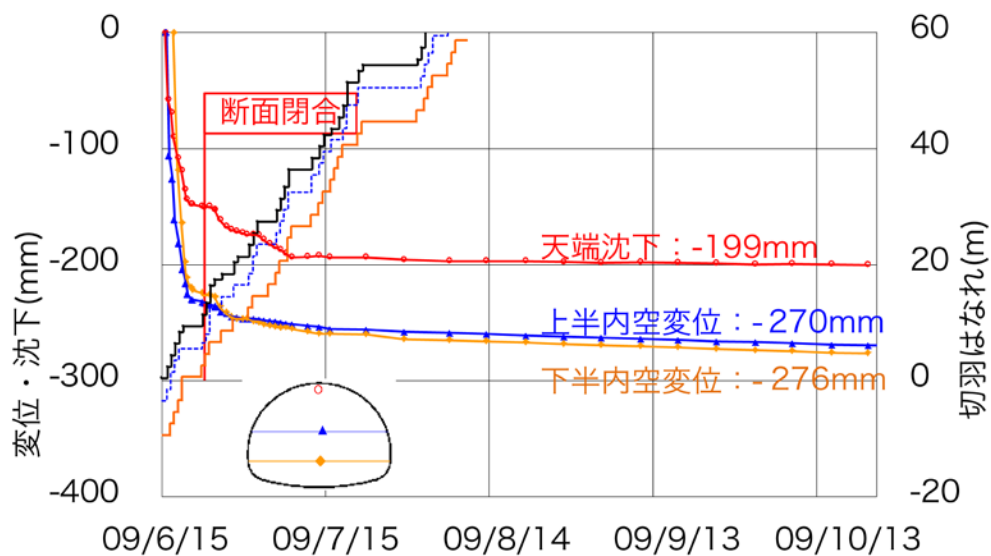
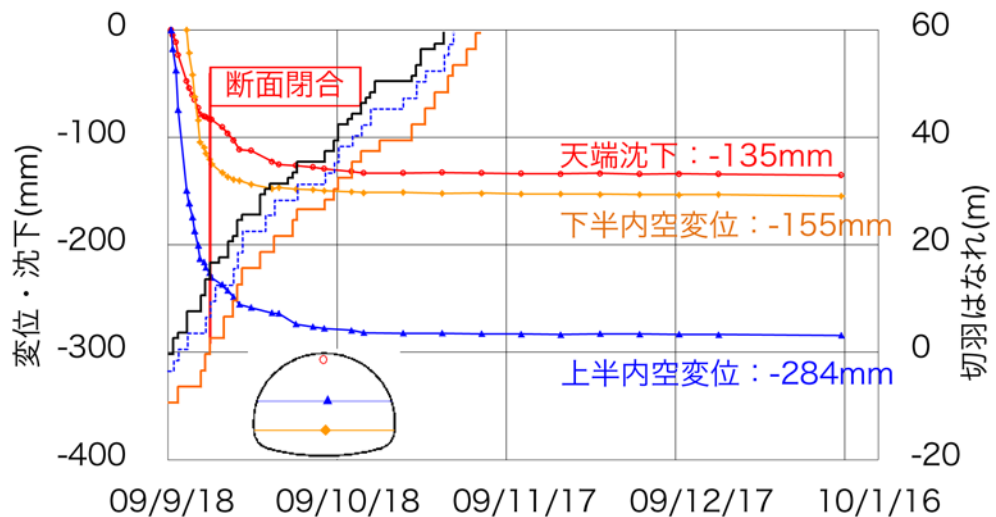


図-12 高強度吹付けと瞬結吹付けコンクリートに発生する応力の比較¹²⁾



(a) 当初支保パターン



(b) 瞬結吹付けコンクリートを採用した支保パターン

図-13 当初支保パターンと瞬結吹付けコンクリートを採用した支保パターンに生じた変位(天端沈下・内空変位)の経時変化図¹²⁾

また、図-13に示されるように、当初の二重支保パターンと瞬結吹付けコンクリートを用いた支保パターンの最終変位に顕著な差は生じなかった。このことより、瞬結吹付けコンクリートを用いて二次側の鋼製支保工を省略した支保が当初の二重支保パターンと同等の支保効果(変形抑制)を発揮したと考えられる。

瞬結吹付けコンクリートを用いた支保パターンでは、アーチ部の総吹付け厚を55cmから45cmに軽減したこと、二次側の鋼製支保工を省略したことおよびアーチ部二次側の吹付け作業をインバート施工時に同時にしたことによりサイクルタイムを約20%短縮することができた。加えて、機械設備の増強、作業編成の追加により、当初の月進28m程度に対し、安定して月進40m程度まで向上することができた。

§5.おわりに

本報では、吹付け直後の若材齢における強度・剛性の発現性の高い吹付けコンクリートとして瞬結吹付けコンクリートの開発背景、本吹付けコンクリートの力学特性について紹介するとともに、現場適用事例から本吹付けコンクリートの有効性について報告した。

穂別トンネル以降、中部横断道 八之尻トンネルでは、

変状が発生した区間に、一般国道40号音中トンネルでは坑口部の沈下対策と中央部の地圧対策の支保として利用されるなど社内における活用が広がっている。また、昨年度より、同業他社においても本技術を採用する案件ができており、社内外で本技術の活用が更に進むことが期待できる。

高レベル放射性廃棄物処分施設に適用すれば、本技術を用いることで高い地圧の厳しい立地条件において、高速施工とトンネル構造体の安定性確保が可能となる。

現在、環境負荷低減等に寄与する材料として、新たに低アルカリ性という付加価値を付けた「低アルカリ性瞬結吹付けコンクリート」の開発^{13),14),15),16)}も実施しており、「吹付け後の若材齢時における強度・剛性が大きな吹付けコンクリート」の技術の開発と展開に今後も務めていきたい。

謝辞

本研究・開発は電気化学工業株式会社と共同で実施した。本研究・開発を行うに際しては、電気化学工業株式会社 石田積氏、岩崎昌浩氏、寺島勲氏、小菅啓一氏、荒木俊昭氏、奥山康二氏ら多くの方のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 土木学会：“トンネル標準示方書 山岳工法・同解説 2006年度制定”，p.71, 2006.
- 2) 土木学会：“トンネル用語辞典”，トンネルライブラリー，第3号，p.86, 1987.
- 3) 土木学会：“吹付けコンクリート指針(案)[トンネル編]”，トンネルライブラリー-121，p.13, 2005.
- 4) 畑元浩樹，土宏之，羽鳥明満，小池章久，志田原巧，新孝一，澤田昌孝，秦野輝儀，石井卓，熊坂博夫：“高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る地下施設の建設可能性に関する軟質岩の岩盤評価法の構築”，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集CS1-069，pp.137~138, 2004.
- 5) 石井卓，熊坂博夫，栗田守朗，石田積，岩崎昌浩：“材齢3時間で18kN/mm²の剛性を発揮する吹付けコンクリート”，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集CS5-037，pp.279~280, 2006.
- 6) 中谷篤史，高橋圭一，熊坂博夫，石田積，岩崎昌浩：“小型載荷試験装置を用いた吹付けコンクリートの若材齢における応力~ひずみ特性に関する検討”，トンネル工学報告集，第15巻，pp.23~27, 2005.
- 7) 久秦豊，登坂敏雄，石井卓，石田積：“短時間高剛性吹付けコンクリートの施工試一北陸新幹線 第2魚津トンネル”，トンネルと地下，第15巻，pp.23~27, 2005.
- 8) 中谷篤史，熊坂博夫，高橋圭一，石井卓，岩崎昌浩，寺島勲：“地層処分坑道と同規模の断面における短時間高剛性吹付けコンクリートの吹付け施工試験”，土木学会第63回年次学術講演会，CS05-31，pp.229~230, 2008.
- 9) 中谷篤史，熊坂博夫，高橋圭一，井上孝俊，垣見康介，松尾勝司，高橋俊長：“瞬結吹付けコンクリートの強度発現性状について”，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集VI-009，pp.17~18, 2010.
- 10) 中谷篤史，熊坂博夫，石井卓，土田優，新居直人，中島賢，秦健二：“高強度吹付けコンクリートと瞬結吹付けコンクリートの強度発現特性について”，土木学会第67回年次学術講演会講演概要集VI-019，pp.37~38, 2012.
- 11) 高橋俊長，中野清人，垣見康介：“高耐力支保構造で施工した脆弱地山のトンネル挙動特性”，トンネル工学報告集，vol.38，no.12，pp.7~18, 2007.
- 12) 垣見康介：“施工記録 国内トンネル工事史上まれにみる脆弱地山を克服”，清水建設 土木クォーターリー，vol.173，pp.2~26, 2012.
- 13) 熊坂博夫，石井卓，栗田守朗，多田浩幸，荒木昭俊，奥山康二，岩崎昌浩，小菅啓一：“低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートの開発 (1)低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートの開発概要”，日本原子力学会「2012年秋の大会」，D22，p.128, 2012.
- 14) 奥山康二，荒木昭俊，岩崎昌浩，小菅啓一，熊坂博夫，石井卓，栗田守朗，多田浩幸：“低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートの開発 (2)模擬トンネルにおける吹付け施工試験結果”，日本原子力学会「2012年秋の大会」，D23，p.129, 2012.

- 15) 荒木昭俊, 奥山康二, 岩崎昌浩, 小菅啓一, 熊坂博夫, 石井卓, 栗田守朗, 多田浩幸: “低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートの開発 (3) 模擬トンネルの供試体を用いた溶出試験結果”, 日本原子力学会「2012年秋の大会」, D24, p.130, 2012
- 16) 奥山康二, 荒木昭俊, 岩崎昌浩, 小菅啓一, 熊坂博夫, 石井卓, 栗田守朗, 多田浩幸: “低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートの開発 (4) 模擬トンネルにおける吹付け施工試験結果 その2”, 日本原子力学会「2013年春の年会」, A20, p.20, 2013