

# 青函トンネルにおける吹付けコンクリートの 性状および長期耐久性の評価

芳賀 康司<sup>1</sup>・佐原 圭介<sup>2</sup>・渡邊 修<sup>3</sup>・秋田 勝次<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構設計技術部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

<sup>1</sup>E-mail:yas.haga@jrtt.go.jp

<sup>2</sup>正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構工務部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

<sup>3</sup>正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構北海道新幹線建設局 (〒060-0002 札幌市中央区北2条西1-1)

<sup>4</sup>正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構新幹線部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

青函トンネルは、津軽海峡の海底下約100mにおいて、海水による2.4MPaの高水圧を受けるなど、厳しい環境下にある。また、青函トンネルの作業坑、先進導坑は、吹付けコンクリートによるシングルシェル構造として設計された。このため、覆工材である吹付けコンクリートは、経年に伴う圧縮強度の低下、中性化、海水成分との反応などによる性状の劣化が想定されたことから、吹付けコンクリートのその性状や長期耐久性の把握を目的に、40年以上の長期にわたりコア採取と性状試験（物理的、化学的試験）を行ってきた。

このように、吹付けコンクリートの性状を長期的に調査した事例は、きわめて少ない状況にあることから、青函トンネルにおいて継続して実施してきた吹付けコンクリートの性状試験結果と長期耐久性の評価について報告する。

**Key Words :** shotcrete, undersea tunnel, single shell structure, long term durability

## 1. はじめに

青函トンネルでは、昭和63年の開業以来、その社会基盤としての重要性から、列車運行の安全性確保や構造物の維持管理を目的として、長期的に構造物の品質に関し各種調査を実施してきた。とくに、作業坑や先進導坑は、列車が通行するトンネル本坑と異なり、保守用通路、排水路、換気を目的としたトンネルとして、覆工コンクリートを施工しない吹付けコンクリートによるシングルシェル構造として設計されている。

また、日本で吹付けコンクリートをトンネルの支保部材として本格的に導入したのは、青函トンネルが最初といってもよい。津軽海峡の海底下100mにおいて、海水による2.4MPaの高水圧を受けるなど厳しい特殊環境下であり、高圧湧水によるトンネルへの影響に対して、トンネル周辺への薬液注入による止水、改良とともに、掘削に伴う地山の緩みを極力低減するため、従来の矢板に替えて吹付けコンクリートにより掘削面を支保すること

を基本とした。

ここで、トンネルの健全性を評価するには、一次支保工としての吹付けコンクリートの長期耐久性および覆工コンクリートの長期耐久性が重要となることから、青函トンネルでは、調査坑時代から吹付けコンクリートおよび覆工コンクリートの品質向上に努めた。とくに、吹付けコンクリートは先進導坑、作業坑の最終の構造体として採用することから、在来線開業時よりその性状について継続して調査し、物理的、化学的データを蓄積しながら、吹付けコンクリートの長期的な品質を確認してきた。

現在、吹付けコンクリートの性状や耐久性について、40年以上の長期にわたり調査しており、このような吹付けコンクリートの長期的な性能評価事例は、きわめて少ない状況にあることから、本稿では、青函トンネルにおいて継続して実施してきた吹付けコンクリートの性状試験結果および長期耐久性の評価について報告する。

表-1 吹付けコンクリートの施工数量と使用機械

施工箇所	施工数量 (m <sup>3</sup> )	使用機械
海底部 (竜飛工区)	斜坑	トルクレットS3-II
	先進導坑	トルクレットS3-II・コンパルナスTR-70型 アリバー600型・アリバー260型
	作業坑	トルクレットS3-II・コンパルナスTR-70型 アリバー600型・アリバー260型
	本坑	トルクレットS3-II アリバー600型 アリバー260型
海底部 (吉岡工区)	斜坑	トルクレットS3-II型
	先進導坑	トルクレットS3-II・コンパルナス208型 スピロクリートTMS-1000R II型 アリバー600型・アリバー260型
	作業坑	トルクレットS3-II・ スピロクリートTMS-1000R II型 アリバー600型・アリバー260型
	本坑	アリバー600型 アリバー260型
その他	27 800	—
計	249 600	≒約25万m <sup>3</sup>

## 2. 青函トンネルで使用した吹付けコンクリートと使用機械

青函トンネルで使用した吹付けコンクリートの施工数量と施工機械を表-1に示す。海底部における吹付けコンクリートの施工数量は、本坑等を含め全体で約250 000m<sup>3</sup>であり、この内先進導坑で60 000 m<sup>3</sup>以上、作業坑で50 000 m<sup>3</sup>以上の実績である。吹付けコンクリート施工当初の使用機械は、トルクレットS3-II型であった。しかし、トルクレットは施工能力が小さく、また、乾式工法であり、粉じんの発生量が多かったため、施工能力の向上と坑内環境の改善を目的に、湿式工法であるコンパルナスやスピロクリートを含めた数種の施工機械にて施工性等の吹付け現場試験を行った。

この結果、コンパルナスは、圧送距離が60m程度と小さいこと、スピロクリートは、機材が大きく、作業空間が限られるトンネル内では作業性に劣るなどの問題があったことから、半湿式工法であるアリバー600型を導入することとなった。アリバー600型は、トルクレットと比較して粉じんの発生がやや多いが施工能力は大きく、吐出量は安定するなどの利点があった。この後、さらに施工能力の大きなアリバー260型を導入、以後このアリバー260型が標準的な施工機械として使用されることとなった。代表的な吹付け機械の緒元を表-2に示す。

表-3にトルクレット、アリバーそれぞれの標準的な配合を、表-4に圧縮強度を示す。トルクレットと比較して、平均強度はアリバーがいずれも大きく、比較的ばらつきの少ない吹付けコンクリートを施工することが可能となった。

## 3. 吹付けコンクリート性状試験の概要

表-2 代表的な吹付け機械の緒元

機種・形式	トルクレット S3-II型		アリバー 260型	
	重量 (kg)	640	1 000	1 000
機械諸元	高さ (mm)	1 650	1 550	1 550
	幅 (mm)	870	850	850
	長さ (mm)	1 830	1 650	1 650
能力	圧送量 (m <sup>3</sup> /h)	3~8	6~9	6~9
	骨材最大寸法 (mm)	25	25	25
	圧送ホース内径 (mm)	50	50	50, 65
	空気消費量 (m <sup>3</sup> /min)	12	12	12
	最大水平圧送距離 (m)	400	400	300
	最大鉛直圧送距離 (m)	100	100	100

表-3 吹付けコンクリートの標準的な配合

使用機種	セメント C(kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 S(kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 G(kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 S/A(%)	水セメント比 W/C(%)	セメントの種類	急結材の種類
トルクレット	352	1 155	775	60	45	普通セメント	イソクレット
アリバー	360	1 240	670	65	50	普通セメント	QP-500

表-4 吹付けコンクリートの圧縮強度 (実績)

使用機種	σ3 (N/mm <sup>2</sup> )			σ7 (N/mm <sup>2</sup> )			σ28 (N/mm <sup>2</sup> )		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
トルクレット	22.5	10.5	17.3	28.9	12.2	18.5	34.4	21.9	26.0
アリバー	21.7	16.0	18.4	23.5	22.0	22.8	44.5	37.0	40.3

青函トンネルの作業坑、先進導坑における覆工材である吹付けコンクリートは、開業当初、経年に伴う中性化や海水成分との反応による性状の劣化（膨張性鉱物等の生成）に伴う圧縮強度の低下が想定された。このため、吹付けコンクリートの長期耐久性の把握を目的に、吹付けコンクリートのコア採取と性状試験（物理的、化学的試験）を継続して行ってきた。吹付けコンクリートのコア採取位置図を図-1に、先進導坑、作業坑の標準断面図を図-2に、コア採取箇所詳細図を図-3に示す。

コアの採取箇所数は、作業坑11箇所、先進導坑11箇所の計22箇所であり、平均して1回/2~3年のペースでコアを採取し、性状確認試験を実施している。具体的には、物理的試験として、圧縮強度試験（圧縮強度、静弾性係数）、超音波速度試験（P波速度）、単位体積重量測定、化学的試験として、中性化深さ試験、X線回折試験（エトリングイト、フリーデル氏塩、水酸化カルシウム）、水素イオン濃度（pH）測定、塩素イオン濃度測定を行った。

なお、採取したコアの状態は、一部を除きその大部分は、内空側から岩盤側まで、比較的われ目の少ない棒状が多く、吹付けコンクリートの状態としては良好であった。

## 4. 吹付けコンクリート性状試験の結果

### (1) 物理的試験結果

#### a) 圧縮強度試験（圧縮強度、静弾性係数）

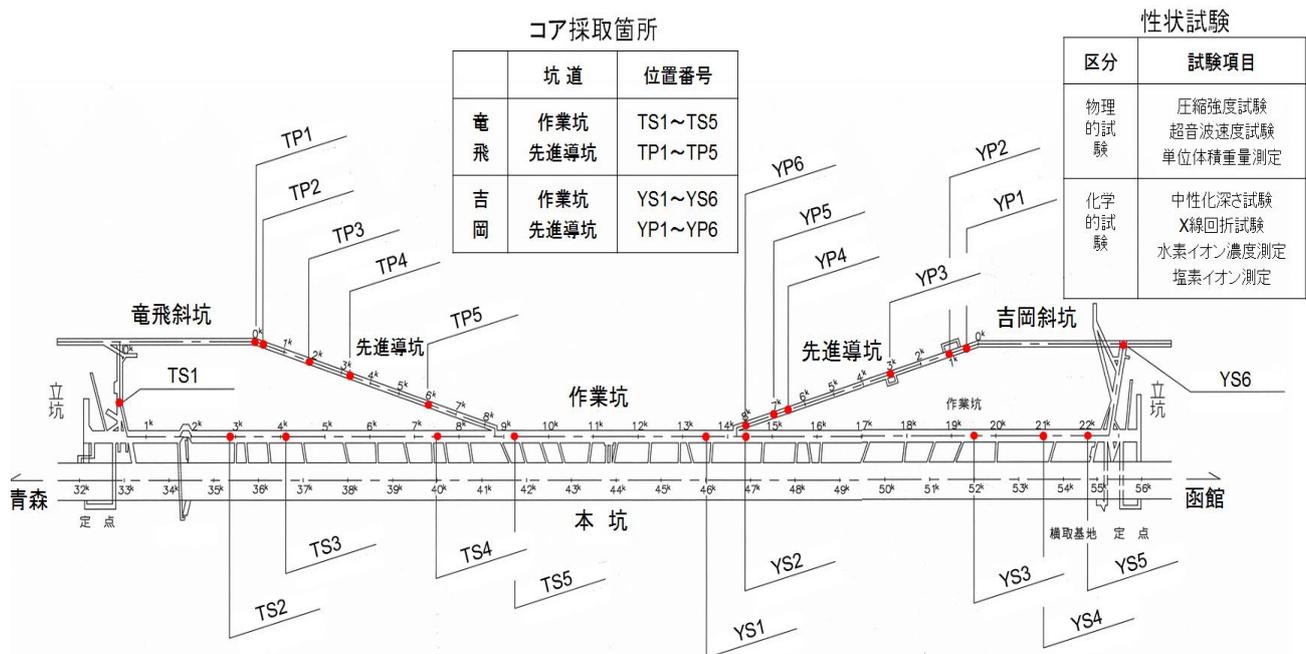


図-1 吹付けコンクリートコア採取位置図

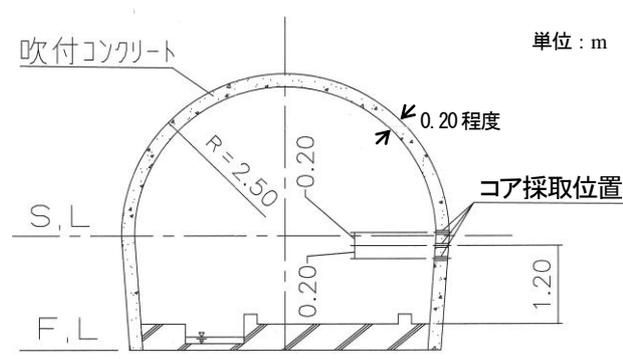


図-2 先進導坑, 作業坑標準断面図

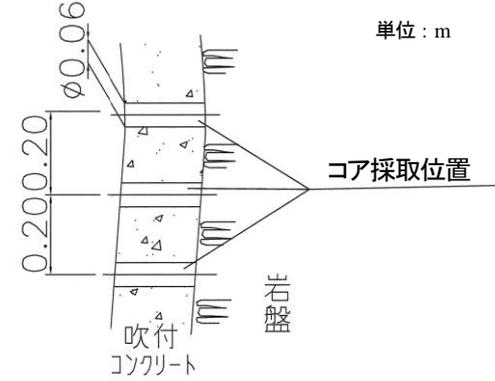


図-3 コア採取箇所詳細図

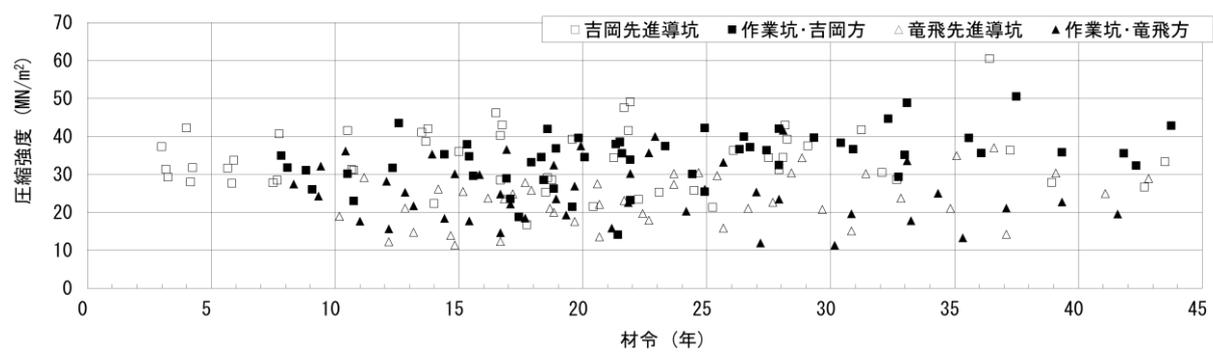


図-4 圧縮強度の経年変化図 (4坑道)

圧縮強度については、材令3年から材令44年の範囲で198試料の試験結果が得られている。

圧縮強度の経年変化を図-4~図-6に示す。図-4の4坑道(吉岡先進導坑, 吉岡方作業坑, 竜飛先進導坑, 竜飛方作業坑)全体の経年変化から、圧縮強度は、概ね10~50MN/m<sup>2</sup>の範囲でばらつきがあるものの、有意な圧縮強度の低下傾向は認められず、青函トンネルで採用された吹付けコンクリートは、長期耐久性を保持している

と考えられる。

図-5に示す吉岡先進導坑における圧縮強度の経年変化は、ばらつきはあるものの、概ね15~50MN/m<sup>2</sup>の範囲にあり、平均値は34.1MN/m<sup>2</sup>である。一方で、図-6に示す竜飛方作業坑における経年変化でも、圧縮強度にばらつきは見られるが、範囲は概ね15~40MN/m<sup>2</sup>、平均値は25.0MN/m<sup>2</sup>であり、吉岡先進導坑よりやや小さな値であった。これは骨材の品質の差によるものと考えられる。

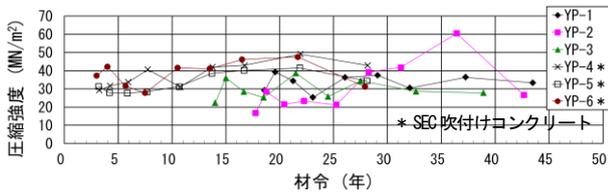


図-5 圧縮強度の経年変化図 (吉岡先進導坑)

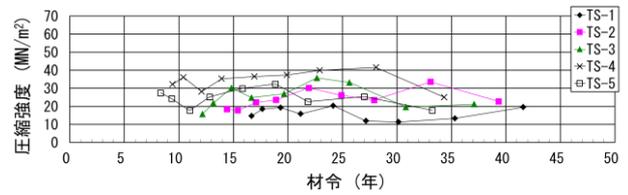


図-6 圧縮強度の経年変化図 (竜飛方作業坑)

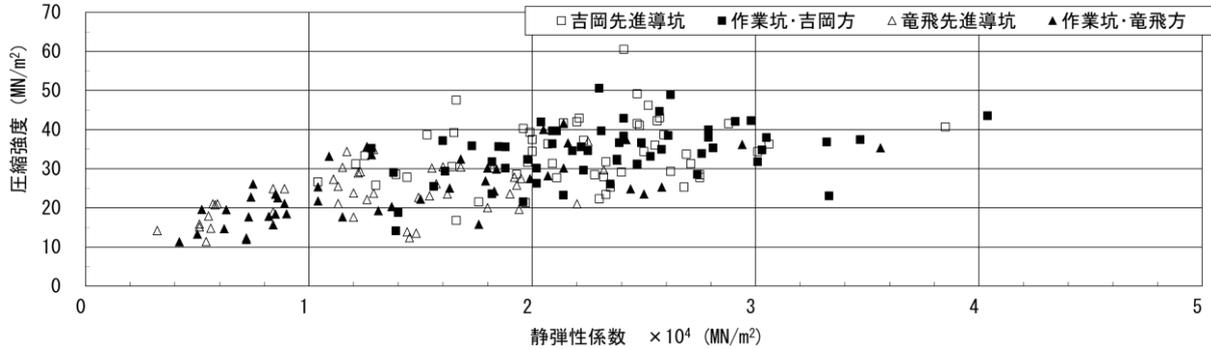


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係図 (4坑道)

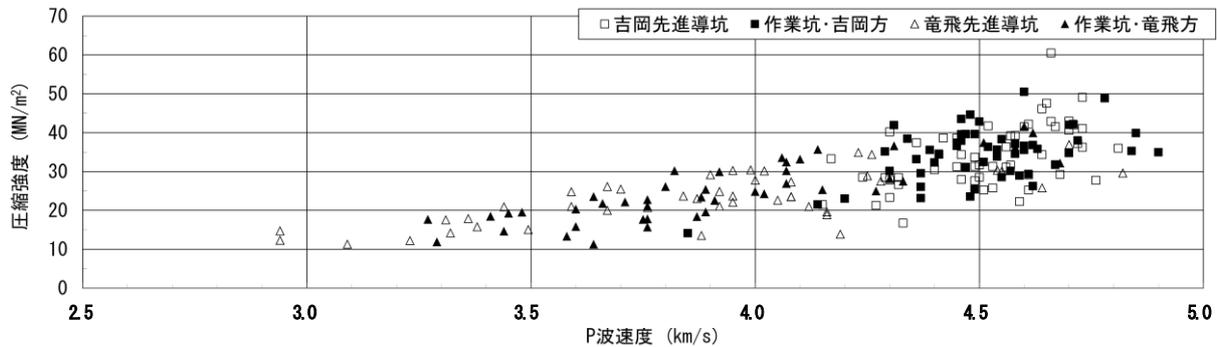


図-8 圧縮強度とP波速度の関係図 (4坑道)

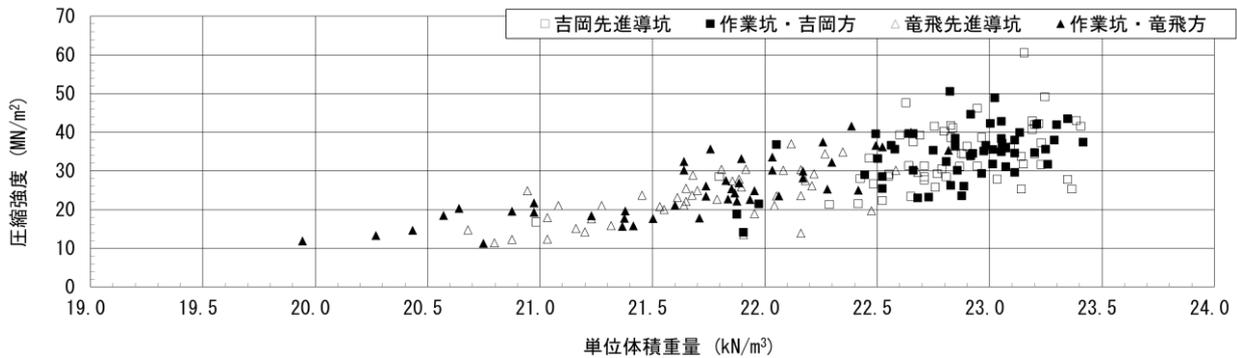


図-9 圧縮強度と単位体積重量の関係図 (4坑道)

全体的な傾向としては、吉岡、竜飛先進導坑ともに、経年後のデータは、“ほぼ一定”または“微増”傾向である。

また、同じ坑道でも採取箇所によって違いが見られ、図-5の吉岡先進導坑では、YP-1～3試料の圧縮強度は概ね20～40MN/m<sup>2</sup>の範囲に、YP-4～6試料で概ね30～50MN/m<sup>2</sup>の範囲にあり、SEC(分割練混ぜ工法)で施工されたYP-4～6で比較的大きな圧縮強度が得られる結果となった。YP-1～3試料では“増減繰り返し”または“ほぼ一定”傾向であり、YP-4～6試料では“微増”となっている。圧縮強度と静弾性係数の関係を図-7に示す。静弾性係

数は、概ね0.4～4×10<sup>4</sup>MN/m<sup>2</sup>の範囲にあり、ややばらつきはあるものの、圧縮強度が増加すると静弾性係数も増加するという一定の相関が見られる。

b) 超音波速度試験 (P波速度)、単位体積重量測定

図-8に圧縮強度とP波速度の関係を示す。P波速度は、概ね3～5km/sの範囲にあり、圧縮強度が増加するとP波速度も増加するという一定の相関が見られる。

図-9圧縮強度と単位体積重量の関係を示す。単位体積重量は、概ね20～23.5kN/m<sup>3</sup>の範囲にあり、P波速度と同

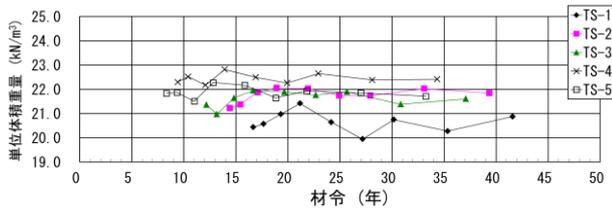


図-10 単位体積重量の経年変化図（竜飛先進導坑）

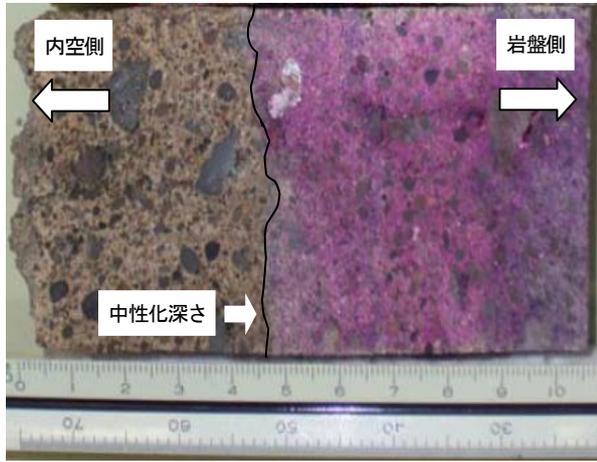


写真-1 中性化深さ試験（竜飛方作業坑 TS-1）

様に、圧縮強度が増加すると単位体積重量も増加する傾向にある。また、当初の単位体積重量の平均値 $22.1\text{kN/m}^3$ と比べて大きな変動は見られず、図-10に示す竜飛方作業坑の単位体積重量からわかるように、単位体積重量は、経年によって大きく変化することはない、初期重量は40年以上経過しても大きな減少は見られない。

青函トンネルにおける吹付けコンクリートは、その黎明期に施工されたものであり、一部品質が十分に確保されていなかった箇所も見られるが、全体的には、現在でも一定の強度を確保していると言える。

## (2) 化学的試験結果

### a) 中性化深さ試験

中性化試験は、内空側からの吹付けコンクリートの中性化深さを把握する目的で実施した。採取した吹付けコンクリートコアをダイヤモンドカッターで縦方向に切断し、フェノールフタレイン溶液を噴霧することで、中性化の進行状況を確認した。pH約9.5～10以上で噴霧した溶液が赤紫色に変色する。写真-1に変色状況を示す。

中性化深さについては、材令3年から材令44年の範囲で176試料の試験結果を対象とした。

吉岡先進導坑における中性化深さの経年変化を図-11に示す。一部に大きな値を示しているが、概ね30mmまでの範囲にある。詳細を見ると、YP-1やYP-3でややばらつきが見られるものの全体的に変動は小さく、材令25年程度までの中性化深さは、10mm程度におさまっている。

一方で、図-12に示す竜飛方作業坑では、中性化深さ

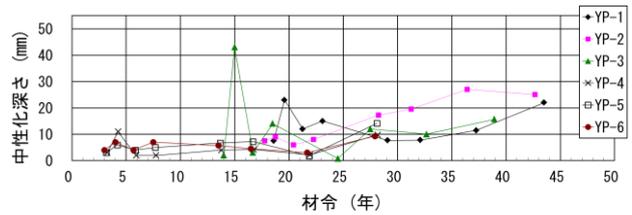


図-11 中性化深さの経年変化図（吉岡先進導坑）

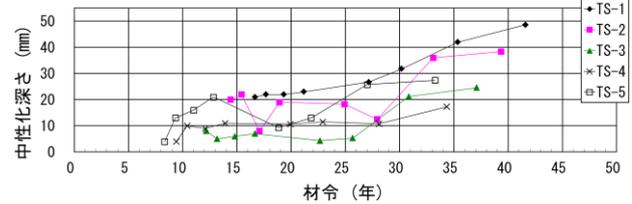


図-12 中性化深さの経年変化図（竜飛方作業坑）

表-5 坑道別中性化深さ

区分	吉岡坑道		竜飛坑道	
	先進導坑	作業坑	先進導坑	作業坑
中性化深さの範囲(mm)	0.8～43.0	0.0～17.0	3.0～53.3	4.0～48.6
	平均 9.5	平均 7.9	平均 15.3	平均 17.7

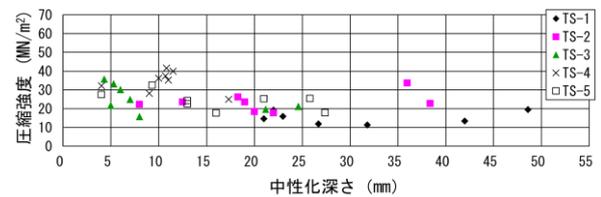


図-13 圧縮強度と中性化深さの関係図（竜飛方作業坑）

はやや大きく、材令25年程度までに、25mmまで中性化が進んでいる。また、材令25年以降では、どちらの坑道も、概ね“増加”傾向に転じており、現時点での中性化の進行の程度は、吉岡先進導坑の約30mmに対し、竜飛方作業坑では、約50mmと吉岡方と比較してやや大きいものの、1.3mm/年程度の進行速度である。

表-5に坑道別の中性化深さおよび平均値を示す。中性化深さの平均値は、吉岡坑道で7.9～9.5mmであるのに対し、竜飛先進導坑では、15.3～17.7mmと中性化深さが大きいことがわかる。これは、4-(1-a)圧縮強度試験で確認された吹付けコンクリートの圧縮強度の大きさも一因と考えられる。

吹付けコンクリートの中性化反応は、コンクリート中の水和生成物である水酸化カルシウムが空気中の二酸化炭素と反応して生成される炭酸カルシウムによって、炭酸化が進行することによるが、4坑道ともに材令25年程度を前後して中性化の進行は、“増加”傾向となっている。

圧縮強度と中性化深さの関係を図-13に示す。竜飛方作業坑、とくにTS-1では、中性化深さが大きい箇所でも圧縮強度が低い傾向が見られたことから、今後の継続調査で、その傾向を注視していく必要がある。

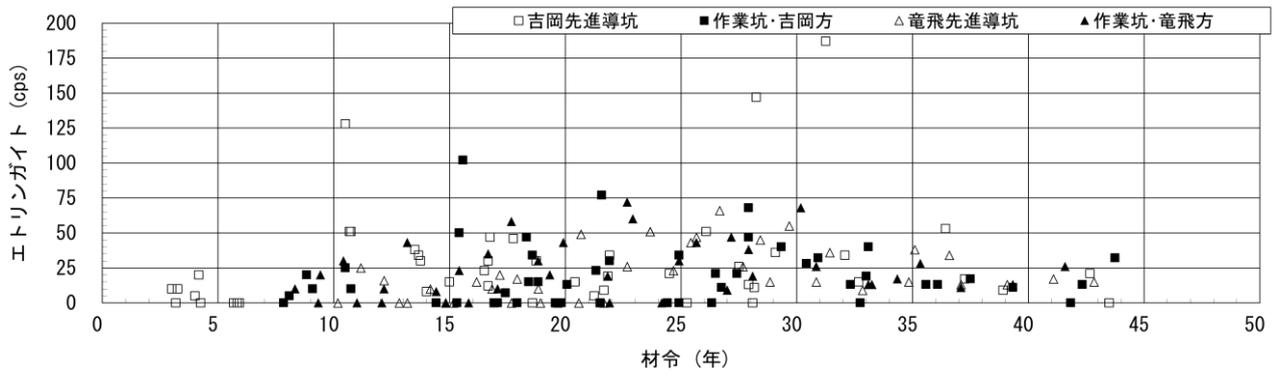


図-14 エトリンガイトの経年変化図 (4坑道)

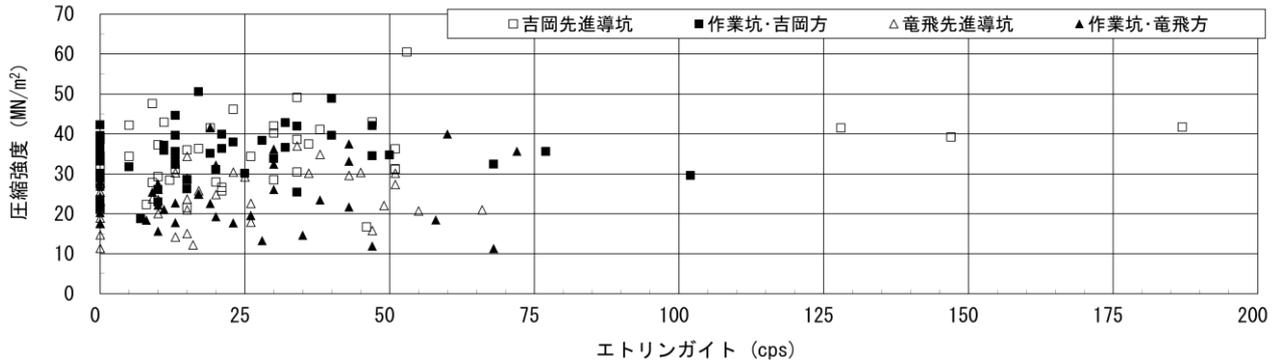


図-15 圧縮強度とエトリンガイトの関係図 (4坑道)

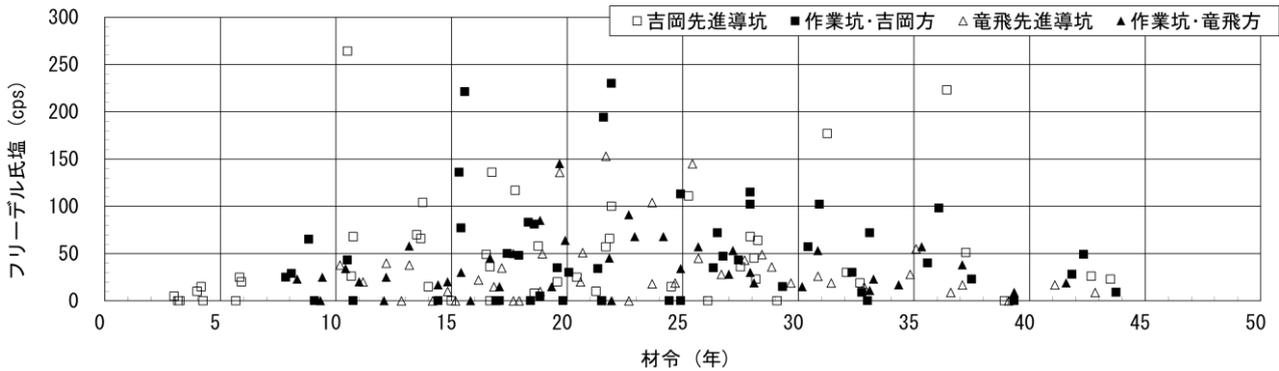


図-16 フリーデル氏塩の経年変化図 (4坑道)

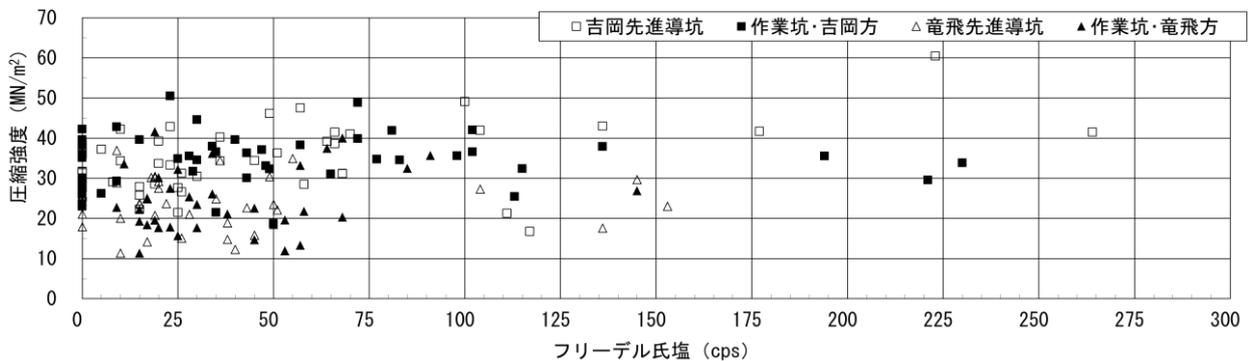


図-17 圧縮強度とフリーデル氏塩の関係図 (4坑道)

b) X線回折試験 (エトリンガイト, フリーデル氏塩, 水酸化カルシウムの生成)

X線回折試験については, 材令3年から材令44年の範囲で176試料の試験結果が得られている。

エトリンガイト回折強度の経年変化を図-14に示す。4坑道全体の経年変化から, エトリンガイトは, 0~190cpsの範囲でばらつきがあり, 経年に伴う一定の傾向は確認できないが, 20年程度でピークに達し, 30年以降は低下傾向を示している。

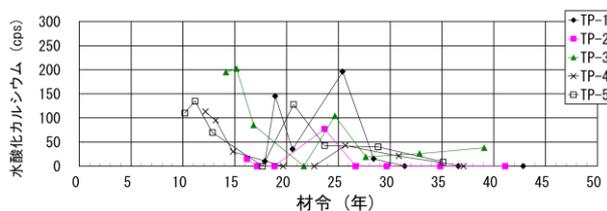


図-18 水酸化カルシウムの経年変化図（竜飛先進導坑）

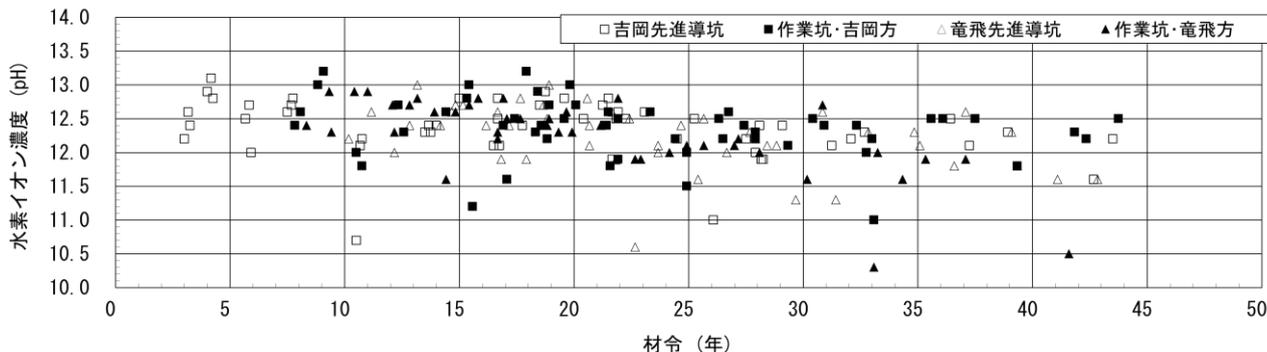


図-19 水素イオン濃度 (pH) の経年変化図 (4坑道)

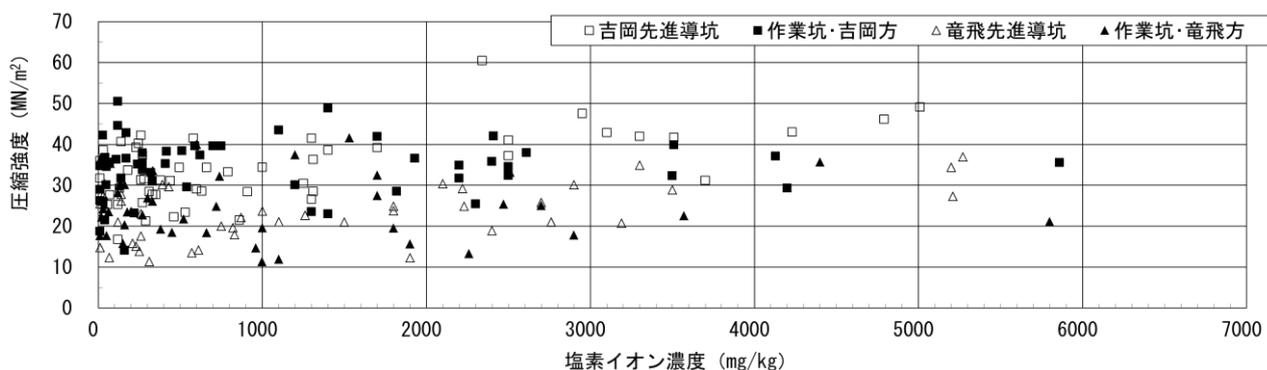


図-20 圧縮強度と塩素イオン濃度の関係図 (4坑道)

また、図-15に圧縮強度とエトリンタイトとの関係を示す。明確な相関性が見られないことから、現時点では、圧縮強度に影響を与えるほど、エトリンタイトの生成は進んでいないと考えられるが、確実にエトリンタイトの生成は確認されているため、今後も継続して調査が必要と考えられる。

フリーデル氏塩回折強度の経年変化を図-16に示す。4坑道全体の経年変化から、フリーデル氏塩は、0～250cpsの範囲でばらつきがあり、経年に伴う一定の傾向は確認できないが、20～25年でピークに達し、それ以降は低下傾向を示している。

また、図-17に圧縮強度とフリーデル氏塩との関係を示す。明確な相関性が見られないことから、現時点では、圧縮強度に影響を与えるほど、フリーデル氏塩の生成は進んでいないものの、生成は確認されているため、エトリンタイトと同様に、今後も継続して調査が必要と考えられる。

図-18に水酸化カルシウムの経年変化を示す。水酸化カルシウムは吹付けコンクリートに含まれ、エトリンタイトおよびフリーデル氏塩の生成とともに減少する。全

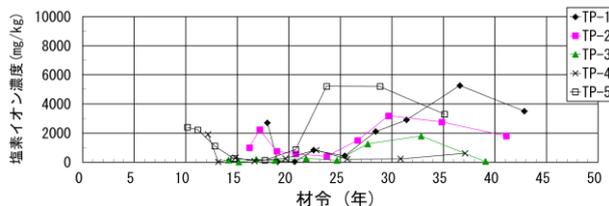


図-21 塩素イオン濃度の経年変化図（竜飛先進導坑）

体的に水酸化カルシウムの回折強度は、経年とともに小さくなっており、25年程度を過ぎてから、その低下は大きくなっている。

#### c) 水素イオン濃度 (pH) 試験

図-19の4坑道全体の経年変化から、pHはばらつきがあるものの概ね10.5～13.0の範囲にあることがわかる。通常、コンクリートのpHは、12.5程度であることからしても、吹付けコンクリートの経年後のpHは、さほど低下していない。

#### d) 塩素イオン濃度試験

図-20に圧縮強度と塩素イオン濃度の関係を示す。ばらつきは大きいですが、塩素イオン濃度が2000mg/kg以上と大きい場合においても、圧縮強度は低下しておらず、塩

素イオン濃度が圧縮強度に与える影響は、ほとんど見られない。図-21に竜飛先進導坑における塩素イオン濃度の経年変化を示す。ばらつきが大きいものの、経年とともに“増加”傾向にあるため、今後も継続して調査が必要と考えられる。

### (3) 性状試験結果のまとめ

吹付けコンクリートの性状試験について、以下にまとめる。

- 1) 圧縮強度は、ばらつきがあるものの有意な圧縮強度の低下傾向は認められず、青函トンネルで採用された吹付けコンクリートは、長期耐久性を保持していると考えられる。
- 2) 圧縮強度が増減すると、静弾性係数、P波速度、単位体積重量も同様に増減するという一定の相関が見られる。
- 3) SECによる吹付けコンクリートは、在来工法によるものと比べて、長期的にも安定して大きな圧縮強度が得られる。
- 4) 圧縮強度と中性化深さに相関は見られないが、一部圧縮強度が低い箇所、中性化深さが大きい傾向が見られたことから、今後の継続調査で、圧縮強度と中性化深さの相関について注視する必要がある。
- 5) 劣化生成物であるエトリングライトおよびフリーデル氏塩の生成は認められるが、現時点で圧縮強度に影響を与えるほどではない。しかしながら、確実に生成は確認されているため、今後も継続して調査が必要と考えられる。
- 6) pHは、概ね10.5～13.0の範囲にあり、通常のコンクリートpH値と比較的近似しており、吹付けコンクリートの経年後のpHは、さほど低下していない。
- 7) 塩素濃度が大きい場合においても圧縮強度は低下しておらず、現時点での塩素イオン濃度が強度に与える影響は見られない。

## 5. まとめ

青函トンネルにおいて、吹付けコンクリートの劣化要因として考えられる中性化や膨張性鉱物等の生成状況と吹付けコンクリートの圧縮強度との関係について検証するため、吹付けコンクリートの性状試験について、40年以上の長期にわたり実施してきた。

吹付けコンクリートの性状試験結果から、青函トンネルにおける吹付けコンクリートの耐久性について総合的に判断すると、青函トンネルで採用された吹付けコンクリートは、現時点でも大きな強度の低下は確認されておらず、海底トンネルという厳しい特殊環境下においても、長期耐久性を保持していると考えられる。

一方で、吹付けコンクリートの劣化要因に関連する化学的性状試験を今後も継続することで、青函トンネルの長期耐久性を確認していく必要がある。

また、現在、機構で標準的に使用されている高品質な吹付けコンクリートは、青函トンネルにおいて開発されたSEC吹付けコンクリートであり、吹付け材料および配合とも大きく改良が加えられ、安定した品質で十分な強度が発現されている<sup>1),2)</sup>ことから、今回報告した評価を越える長期耐久性を有しているものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 登坂敏雄, 阿部敏夫, 朝倉俊弘: トンネル覆工の単一構造化における現場計測による検証と適用に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.4, 1079-1090, 2007.12
- 2) 伊藤祐二, 登坂敏雄, 櫻井清一, 末永充弘, 朝倉俊弘: 高品質吹付けコンクリートの施工特性に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, 419-430, 2009.10

(2013.9.2受付)

## EVALUATION ON PROPERTY AND LONG TERM DURABILITY OF SHOTCRETE IN SEIKAN TUNNEL

Yasushi HAGA, Keisuke SAHARA, Osamu WATANABE, and Katsuji AKITA

Seikan Tunnel is surrounded by severe environment and receives high water pressure of 2.4MPa by the seawater, which lies under approximately 100 meters of the bottom of the sea of the Tsugaru Strait. To grasp the property of shotcrete and long term durability, we have been conducted coring and property tests over a long time period, more than 40 years. There are extremely few research examples of the property of shotcrete on a long-term basis.

We report the test results of the property of shotcrete, which was enforced on a continual basis, and evaluation on a long-term durability in the Seikan Tunnel.