

# 混和材料を用いた初期強度促進工法「アーリークリート」について

## "EARLY CREAT" - A METHOD FOR ENHANCING INITIAL STRENGTH USING ADMIXTURES

澤村 淳美\*<sup>1</sup>, 土師 康一\*<sup>2</sup>, 守屋 健一\*<sup>3</sup>, 奥村 正樹\*<sup>4</sup>  
Atsumi SAWAMURA, Koichi HAZE, Kenichi MORIYA, Masaki OKUMURA

For mountain tunnel lining concrete, shield tunnel secondary lining concrete, and similar construction projects where the time from placing concrete to removing forms is relatively short, the initial strength required for removing forms is a factor in maintaining the process. However, it is often difficult to obtain the strength required for removing forms since it depends on environmental conditions and concrete mixing conditions, including construction during cold weather and using concrete with improved fluidity. On the other hand, currently the main countermeasures are to promote strength development by changing the type of cement, increasing the unit amount of cement, and devising an efficient curing method. Against this background, the Company and Taiheiyo Material Co., Ltd. have developed a nitrogen-based inorganic salt type hardening accelerator and a lime type early-strength expansive material, which has higher reactivity than ordinary expansive materials, for the purpose of enhancing the initial strength of concrete. We developed a combined concrete mix, and adopted the construction method using this mix as "Early Creat." In this paper, we will report the results of indoor tests and cases of this method where it has been put into practice.

**Keywords :** Tunnel lining concrete, Early age strength, Low temperature environment, Medium flow concrete  
覆工コンクリート, 初期強度, 低温環境, 中流動コンクリート

### 1. はじめに

トンネル標準示方書<sup>1)</sup>によると, 山岳トンネルの覆工コンクリートにおけるセントル脱型時期は, 通常, コンクリート打込み後 12~20 時間で行われることが多く, 脱型強度は 2~3N/mm<sup>2</sup> 程度を目安にするとされている。また, シールド工法<sup>2)</sup>では, 二次覆工コンクリートの脱型までの時間は, 15~19 時間とすることが多く, 脱型強度は 3~6N/mm<sup>2</sup> 程度が多いとされている。このように, 覆工コンクリートでは, 施工サイクルを確保するために, 一般構造物と比較して早期脱型となり, とくに初期の強度発現が必要となる場合が多い。しかし, コンクリートの強度発現については温度依存性があり, 寒中施工では低温環境となるため初期強度の発現が遅延し, 施工サイクルの確保が困難となる場合がある。

このような背景の下, 当社と太平洋マテリアル(株)は, 普通コンクリートの初期強度促進を目的として, 窒素系無機塩タイプの硬化促進剤と, 通常の膨張材よりも反応性が高い早強型膨張材を併用したコンクリート配合を開発し, この配合を用いた施工を「アーリークリート」として工法化した。

本稿では, 今回開発した「アーリークリート」について, はじめに工法概要を述べた後, 同配合の基礎試験結果として, 各種条件下で実施したフレッシュ性状や長期耐久性, 強度発現性の室内試験結果を述べ, 最後に, 「福岡市八田第 15 雨水幹線築造工事 (3)」と「福島県道路橋りょう整備 (再復) 工事 (トンネル)」の 2 現場で実施した試験施工結果について述べる。

### 2. アーリークリートについて

今回開発した「アーリークリート」は, 一般的に初期強度の発現が遅延傾向にあるコンクリートに対して養生時間が 1 日未満の強度発現を 1~3N/mm<sup>2</sup> 程度向上させることを目的としたコンクリートである。具体的には, トンネル工事における覆工コンクリートを対象とし, 寒中コンクリートや混合セメントを用いたコンクリート, 流動性の高いコンクリートなどに対して効果が期待できる。本工法では, 一般的なコンクリート配合に, 早強型膨張材と硬化促進剤を添加することで, 所要の施工性状を確保したうえで初期強度の促進を可能とした。この工法により, 確実に初期強度を確保することで, 脱型時の剥離やひび割れのリスクを低減することが可能となる。写真 1~3 に使用した混和材料とその使用状況について示す。



写真 1 硬化促進剤投入状況

\*1 戸田建設株式会社土木技術部

\*2 戸田建設株式会社土木技術部 修士 (工学)

\*3 戸田建設株式会社技術開発センター 修士 (工学)

\*4 戸田建設株式会社技術開発センター

Civil Engineering Department, TODA CORPORATION

Civil Engineering Department, TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION



写真2 早強型膨張材投入状況



写真3 硬化促進剤

### 3. 室内試験

#### 3.1 低温環境試験

##### (1) 試験概要

低温環境における初期強度促進効果を確認するため、まずは材料的な観点からの性能評価を実施した。一般的にコンクリートの凝結反応は、温度依存性があるため、低温環境下においては、凝結が相対的に遅延する傾向にある。ここでは、低温環境下における「アーリークリート」配合の強度性状を確認するため、室温10°Cの低温環境下における室内試験を実施した。

##### (2) 試験材料および試験配合

表1に使用材料一覧を示す。本試験では、一般的に初期強度の発現性が普通セメントに比べて低い高炉セメントB種を使用した。

表2に今回試験のコンクリート配合を示す。基礎試験1配合では、強度促進効果のある材料の評価に主観を置き、単独および併用使用による効果を確認した。基礎試験2配合では、硬化促進剤を併用した場合におけるコンクリートの配合強度による影響を確認するため、単位水量一定(単位水量:165kg/m<sup>3</sup>)で、水セメント比を45.9~55.0%(単位セメント量:300~360kg/m<sup>3</sup>)の範囲で4水準設定した。また、早強型膨張材は細骨材置換えで使用し、使用量は20kg/m<sup>3</sup>とした。さらに、硬化促進剤はコンクリート練混ぜ後にあと添加し、使用量については、セメント質量の3%とした。

##### (3) 測定項目および測定方法

表3に測定項目および測定方法を示す。本試験における室内環境温度は、冬期のトンネル坑口の平均温度を考慮し10°Cとした。

フレッシュ性状試験については、練上がり直後(0分)と経時変化(練上がりからの経過時間30,60分)を測定し、目標値をスランブ15cm(±2.5cm)、空気量4.5%(±1.5%)とした。また、若材齢強

度については、室温10°Cの気中養生と断熱養生で実施し、断熱養生については、木箱内面に断熱材を貼り付けた簡易断熱容器を用いて実施した。圧縮強度の測定は、材齢1日で脱型し10°C気中養生にて試験に供した。

表1 使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	高炉セメントB種, 密度3.04g/cm <sup>3</sup>
膨張材	EX	石灰系早強型膨張材, 密度3.19g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	掛川産山砂, 密度2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.2%
粗骨材	G	桜川産砂岩碎石, 密度2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.67%
混和剤	F-L	窒素系無機塩化合物, 密度1.35g/cm <sup>3</sup>
	Ad	AE減水剤 高機能タイプ

表2 コンクリート配合

	配合名		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						F-L (kg)	
	1	2			W	C	EX	S	G	Ad		
基礎試験1	1	PL	55.0	48.0	170	310	-	843	942	C×	-	
	2	EX			170		20	827		0.4%	-	
	3	F-L			161		-	843		C×	9	
	4	EX+FL			161		20	827		0.5%	9	
基礎試験2	5	Fc24	55.0	48.0	165	300	20	837	954	C×	9	
	6	Fc27	51.6			320		829	944		9	
	7	Fc30	48.6			340		821	936		0.3%	10
	8	Fc33	45.9			360		813	926		10	

※基礎試験1の4.EX+FLはアーリークリートである。基礎試験2はすべてアーリークリートである。

表3 測定項目および測定方法

分類	測定項目	測定方法	
フレッシュ性状	スランブ	JISA 1101	15±2.5cm
	空気量	JISA 1128	4.5±1.5%
	コンクリート温度	JISA 1156	経時変化0.30,60分
硬化性状	若材齢強度	JIAA 1108	気中および簡易断熱養生 材齢15,18,21,24時間
	圧縮強度		気中養生 材齢7日,28日

#### (4) 試験結果

##### a) フレッシュ性状

表4および表5にフレッシュ性状の試験結果を示す。表より、各配合において、所定のフレッシュ性状を満足し、経時60分までのスランブの低下量にも大きな差は確認されなかった。試験結果より、今回試験の範囲では、一般的な配合と同様に「アーリークリート」配合についても単位セメント量の増加がフレッシュ性状に与える影響は少ないと考える。

##### b) 凝結時間

図1および図2に凝結時間試験結果を示す。図より、早強型膨張材や硬化促進剤を使用もしくは併用することで始発および終結の

凝結時間が早まることが分かる。また、単位セメント量の増加によっても同様な現象が確認された。

c) 圧縮強度

図 3 および図 4 に若材齢強度の試験結果を示す。図 3 より、早強型膨張材や硬化促進剤を使用することで初期強度発現性が大きくなり、特に早強型膨張材と硬化促進剤の併用である「アーリークリート」配合で、初期強度発現性が最も大きくなることがわかる。

その値は、24 時間で PL が  $0.54\text{N/mm}^2$  に対し、EX+F-L で  $1.86\text{N/mm}^2$  となり、3 倍以上の数値となっていることが分かった。また、図 4 よりコンクリートの配合強度による影響については、配合強度の増加に伴い若材齢強度も増加する傾向となった。この結果は、コンクリートの強度ポテンシャルである配合強度に応じて、早強型膨張材と硬化促進剤の併用による初期強度発現性が大きく変わることを示唆しているものと考ええる。

表 4 フレッシュ性状試験結果 (基礎試験 1)

		直後	30分	60分
PL	SL(cm)	15.0	12.0	9.0
	Air(%)	4.5	4.5	3.7
	CT(°C)	11	11	12
EX	SL(cm)	16.0	13.0	12.0
	Air(%)	5.2	5.0	4.5
	CT(°C)	13	13	13
F-L	SL(cm)	14.5	13.0	9.0
	Air(%)	4.9	4.9	4.5
	CT(°C)	12	13	12
EX+F-L	SL(cm)	15.0	14.0	12.5
	Air(%)	4.9	4.8	4.5
	CT(°C)	13	13	14

表 5 フレッシュ性状試験結果 (基礎試験 2)

		直後	30分	60分
Fc24	SL(cm)	16.5	13.5	10.0
	Air(%)	4.2	4.0	3.9
	CT(°C)	13	14	14
Fc27	SL(cm)	15.0	12.0	10.0
	Air(%)	4.5	4.3	3.9
	CT(°C)	14	14	14
Fc30	SL(cm)	14.0	12.0	9.5
	Air(%)	4.8	4.1	4.2
	CT(°C)	14	14	14
Fc33	SL(cm)	13.0	10.5	7.5
	Air(%)	4.2	3.7	3.6
	CT(°C)	14	15	15

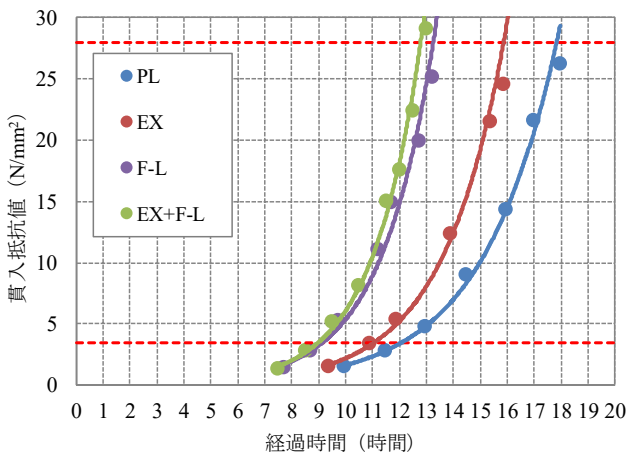


図 1 凝結時間試験結果 (基礎試験 1)

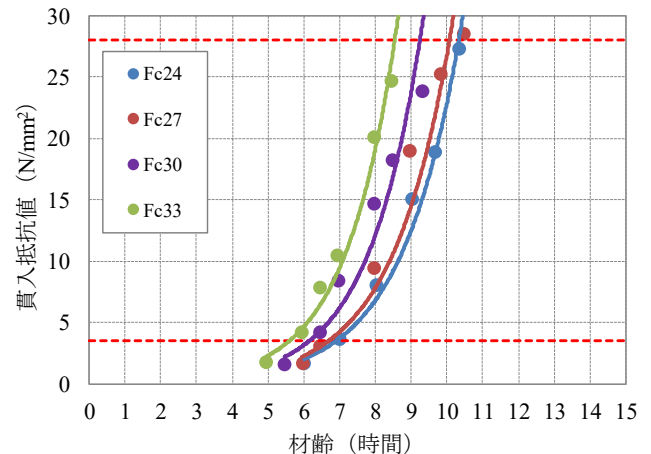


図 2 凝結時間試験結果 (基礎試験 2)

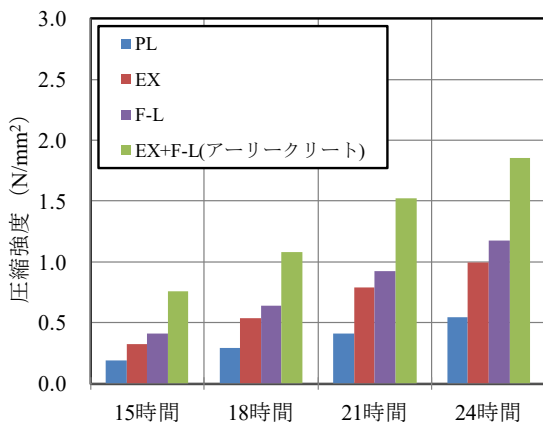


図 3 若材齢強度試験結果 (基礎試験 1, 気中養生)

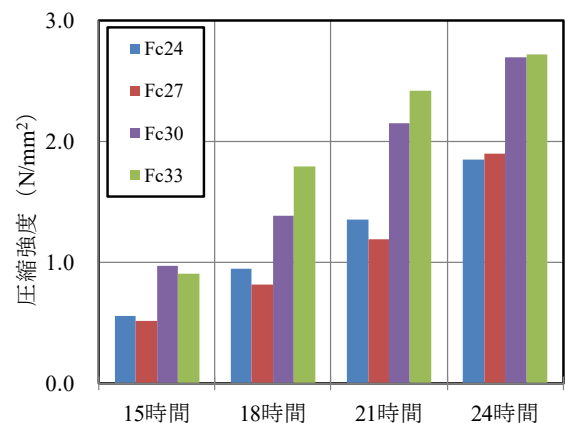


図 4 若材齢強度試験結果 (基礎試験 2, 気中養生)

表 6 に 10℃気中養生および断熱養生を行った圧縮強度試験結果を示す。また、表 7 に圧縮強度率の結果を示す。ここで、圧縮強度率については以下の式を用いて算出した。

$$\text{圧縮強度率 (\%)} = \text{若材齢強度} / \text{7日圧縮強度} \times 100 \quad \dots \text{式 (1)}$$

圧縮強度率とは、材齢 7 日（気中）の強度発現率を 100%と仮に設定し、若材齢強度が材齢 7 日強度に対しどの程度の強度発現率となったかを表す指標である。

表 6 より、早強型膨張材や硬化促進剤を使用することで、各材齢における圧縮強度の増加が見込めることが分かる。また、材齢によらず圧縮強度は配合強度に比例した。さらに、気中養生より簡易断熱養生の強度発現性が高いことから、早強型膨張材と硬化促進剤を併用した「アーリークリート」配合は強度発現に養生温度の影響を大きく受け、温度依存性があることがわかる。

表 7 より、早強型膨張材と硬化促進剤の効果は配合強度に依らずほぼ一定の強度発現率を示しており、定量的に評価ができることから、「アーリークリート」配合の若材齢強度は、コンクリートの強度ポテンシャルに依存するものと考察される。

表 6 圧縮強度試験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

配合		15h	18h	21h	24h	7日	28日	
基礎試験 1	気中養生	PL	0.19	0.29	0.41	0.54	8.4	13.2
		EX	0.32	0.54	0.79	0.99	12.5	23.2
		F-L	0.41	0.64	0.92	1.18	12.0	20.6
		EX+F-L	0.76	1.08	1.52	1.86	14.3	22.3
	簡易断熱養生	PL	0.26	0.46	0.68	0.68	-	-
		EX	0.50	0.84	1.29	1.29	-	-
		F-L	0.63	0.17	1.71	1.71	-	-
		EX+F-L	0.95	1.74	3.37	3.37	-	-
基礎試験 2	気中養生	Fc24	0.56	0.95	1.35	1.85	14.1	22.2
		Fc27	0.52	0.81	1.19	1.90	16.3	26.2
		Fc30	0.97	1.39	2.15	2.69	18.6	26.6
		Fc33	0.90	1.79	2.42	2.72	20.1	28.0
	簡易断熱養生	Fc24	1.21	2.23	3.00	3.43	-	-
		Fc27	1.59	2.36	3.58	4.14	-	-
		Fc30	2.05	3.39	4.13	4.92	-	-
		Fc33	2.38	3.69	4.92	6.19	-	-

表 7 圧縮強度率 (%) (基礎試験 2, 気中養生)

	15 時間	18 時間	21 時間	24 時間
Fc24	4%	7%	10%	13%
Fc27	3%	5%	7%	12%
Fc30	5%	7%	12%	14%
Fc33	5%	9%	12%	14%
平均値	4%	7%	10%	13%

### 3.2 中流動コンクリート配合

#### (1) 試験概要

一般的に流動性の高い中流動コンクリート配合（スランプフロー：350～500mm）では、同程度の設計基準強度の普通コンクリートと比較して、若材齢における強度発現が遅延する傾向があることが知られている<sup>3)</sup>。そこで本試験では、ベースコンクリートとして中流動コンクリートを使用した「アーリークリート」配合の室内比較試験を実施した。試験は、ベースとなる中流動コンクリート配合と、細骨材置換で早強型膨張材のみを添加した配合、ならびに早強型膨張材と硬化促進剤を添加した「アーリークリート」配合について実施した。

#### (2) 使用材料および試験配合

表 8 に使用材料一覧を示す。本試験では、セメントとして普通ポルトランドセメントを使用し、混和剤としてポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤（増粘剤一液型）を使用した中流動コンクリート配合を用いて試験を行った。

表 9 に本試験のコンクリート配合を示す。本配合は、水セメント比 50%（単位セメント量：350kg/m<sup>3</sup>）の中流動コンクリート配合とし、ベース配合（No.1）とベース配合に細骨材置換で早強型膨張材を使用した配合（No.2）、ベース配合に早強型膨張材と硬化促進剤を使用した「アーリークリート」配合（No.3）の 3 水準で試験を行った。

表 8 使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16 g/cm <sup>3</sup>
膨張材	EX	石灰系早強型膨張材、密度 3.19 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	掛川産山砂、密度 2.57 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 2.2%
粗骨材	G	桜川産砂岩砕石、密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.67%
混和剤	F-L	窒素系無機塩化合物、密度 1.35 g/cm <sup>3</sup>
	SP	高性能 AE 減水剤標準形（増粘剤一液型）

表 9 中流動コンクリート配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						F-L (kg)
			W	C	EX	S	G	SP	
1 PL	50.0	51.0	175	350	-	878	970	C×	-
2 EX					20	861		1.1	-
3 EX+F-L					%				10

表 10 測定項目および測定方法

分類	測定項目	測定方法	
フレッシュ性状	スランプフロー	JISA 1150	425±75cm
	空気量	JISA 1128	4.5±1.5%
	コンクリート温度	JISA 1156	経時変化 0, 30, 60 分
	凝結時間	JISA 1147	
硬化性状	若材齢強度	JIAA 1108	材齢 15, 18, 21, 24 時間
	圧縮強度		材齢 7, 28 日

(3) 試験項目および測定方法

表 10 に試験項目および測定方法を示す。本試験は、室温 20℃、相対湿度 80%の試験室内で試験を行った。フレッシュ性状については、練上がり直後 (0 分) と経時変化 (練上がりからの経過時間 30、60 分) について試験を行い、フレッシュ性状の目標値としては、スランプフローを 425mm (±75mm)、空気量を 4.5% (±1.5%) とした。また、硬化性状については、材齢 15、18、21、24 時間の若材齢強度と、材齢 7、28 日について試験を行った。本試験では、高性能 AE 減水剤の使用量について配合条件を同一とするため、すべての配合で同一使用量 (C×1.1%) とし性状比較を行った。

(4) 試験結果

a) フレッシュ性状

表 11 にフレッシュ性状の経時変化試験結果を示す。各水準で練混ぜ直後の目標値は満足したものの、同一混和剤量にも関わらず早強型膨張材を添加することで、練混ぜ直後のスランプフローが増加していることがわかる。また、液状の硬化促進剤をあと添加した配合については、さらにスランプフローが増加することが確認できた。一方、スランプフローの経時変化については各配合において、概ね同様な傾向を示した。このことから、早強型膨張材と硬化促進剤の添加による影響は、添加後のフレッシュ性状に限定され、経時変化 (練上がり～60 分) に大きな影響を及ぼさないと考える。

表 11 フレッシュ性状試験結果

		直後	30 分	60 分
PL	SLF(mm)	400×400	320×310	275×265
	Air(%)	5.0	4.6	4.2
	CT(℃)	22	22	22
EX	SLF(mm)	480×440	395×375	355×355
	Air(%)	4.6	4.2	4.5
	CT(℃)	23	22	22
EX+F-L	SLF(mm)	490×490	435×420	390×380
	Air(%)	4.8	4.6	4.3
	CT(℃)	23	22	22

b) 凝結時間

図 5 に中流動コンクリート配合における凝結時間試験結果を示す。早強型膨張材を使用した配合については、練混ぜ直後のスランプフローの増加と相まって、始発、終結とも、ベース配合よりも遅延する結果となった。これに対し、早強型膨張材と硬化促進剤を併用した「アーリークリート」配合では、始発、終結ともベース配合よりも促進されており、硬化促進剤の凝結促進効果については、始発前のごく初期から影響を及ぼしていると考えられる。

c) 圧縮強度試験

図 6 に若材齢強度試験結果を示す。早強型膨張材と硬化促進剤を併用することで初期強度の発現性が改善されていることが分かる。これは、図 5 で示した凝結時間の短縮による影響であると考えられる。その値は PL と比較して 1.4～2.2 倍程度であり、平均で 1.8 倍であった。しかし、早強型膨張材を単独使用した場合は PL と概ね同様な強度発現となった。これは、早強型膨張材の使用によるスラ

ンプフローの増加と図 5 で示した凝結時間の遅延が大きく影響しているものと考えられる。

図 7 に材齢 7 日および 28 日における圧縮強度試験結果を示す。材齢 28 日においてすべての水準の圧縮強度がほぼ同一となっていることが分かる。このことより、早強型膨張材や硬化促進剤の使用は初期材齢以外の強度発現には寄与せず、長期の強度発現性に対し影響は少ないものと考えられる。

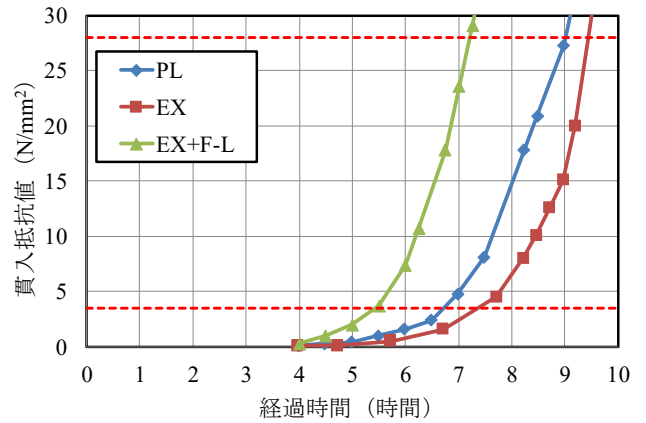


図 5 凝結時間試験結果

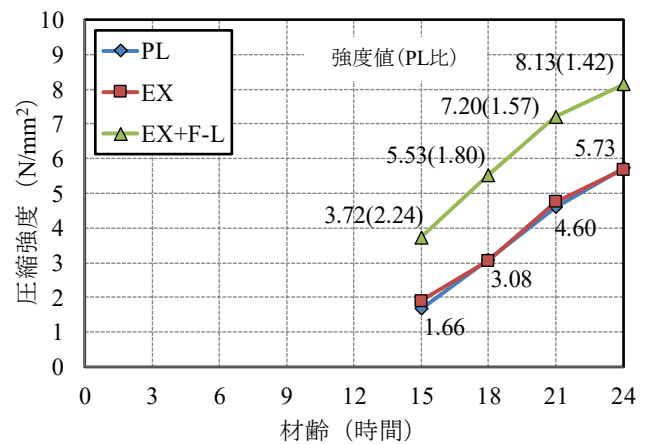


図 6 若材齢強度試験結果

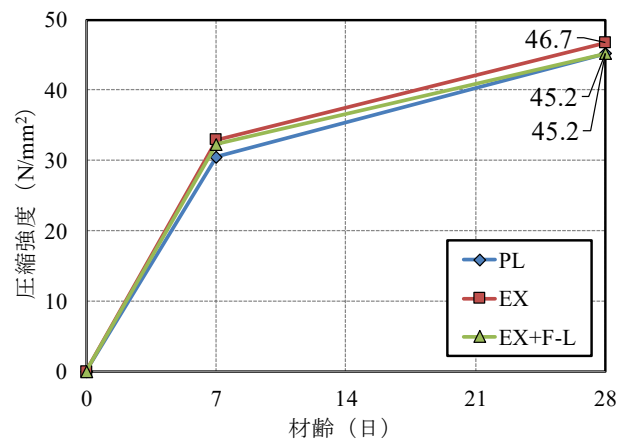


図 7 圧縮強度試験結果

### 3.3 長期耐久性試験

#### (1) 試験概要

本試験では、早強型膨張材や硬化促進剤を使用した配合が長期耐久性に及ぼす影響を確認するために、高炉セメント B 種を使用したコンクリートをベースとした「アーリークリート」配合の供試体により耐久性試験を行った。試験はベースコンクリート配合と、細骨材置換で早強型膨張材のみを添加した配合、ならびに早強型膨張材と硬化促進剤を添加した「アーリークリート」配合について実施した。

#### (2) 使用材料および試験配合

使用材料は、表 1 と同様とし、表 12 に本試験のコンクリート配合について示す。本配合は、ベース配合を水セメント比 50% (単位セメント量: 330kg/m<sup>3</sup>) の高炉セメント B 種を使用したコンクリート配合とし、ベース配合 (No.1) とベース配合に細骨材置換で早強型膨張材を使用した配合 (No.2)、ならびに早強型膨張材と硬化促進剤を併用した配合 (No.3) の 3 水準とした。

#### (3) 測定項目および測定方法

表 13 に試験項目および測定方法を示す。本試験は、室温 20℃、相対湿度 80% の練混ぜ環境で供試体採取を行い、所要の養生条件にて養生を行った後に試験を行った。試験項目については、若材齢強度 (材齢: 15~24 時間) と長期材齢を含む圧縮強度試験 (材齢: 7~182 日) に加え、初期強度の促進効果が長期耐久性に及ぼす影響を確認することを目的として、各種耐久性試験を JIS 規格に準拠し実施した。

表 12 コンクリート配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						F-L (kg)	
			W	C	EX	S	G	Ad		
1 PL	50.0	48.0	165	330	-	841	940	0.5	C×	-
2 EX					20	825				
3 EX+F-L					%					

表 13 測定項目および測定方法

測定項目	測定方法	
圧縮強度	JIS A 1108	若材齢 15,18,21,24 時間 材齢: 7,28,91,182 日
拘束膨張試験	JIS A 6202	材齢 7 日まで
乾燥収縮試験	JIS A 1129-2	材齢 7 日以降
凍結融解試験	JIS A 1108	JIS A 6202 試験体
透水試験	JIS A 1404	材齢 28 日にて実施
透気試験	トレント法	乾燥材齢 91 日にて実施

#### (4) 試験結果

##### a) 圧縮強度試験

図 8 に若材齢強度試験結果、図 9 に材齢 182 日までの圧縮強度試験結果を示す。若材齢強度に注目すると、早強型膨張材と硬化促進剤を併用することで初期強度の発現性が改善されていることが分かる。その値は PL と比較して 1.5~1.8 倍程度であり、平均で 1.7 倍であった。その後の圧縮強度については、材齢 182 日においてすべての水準の強度がほぼ同一となり、前項の試験結果と同様、早強型

膨張材と硬化促進剤の効果は、初期材齢に限定され、長期にわたって強度発現性を妨げないと考える。

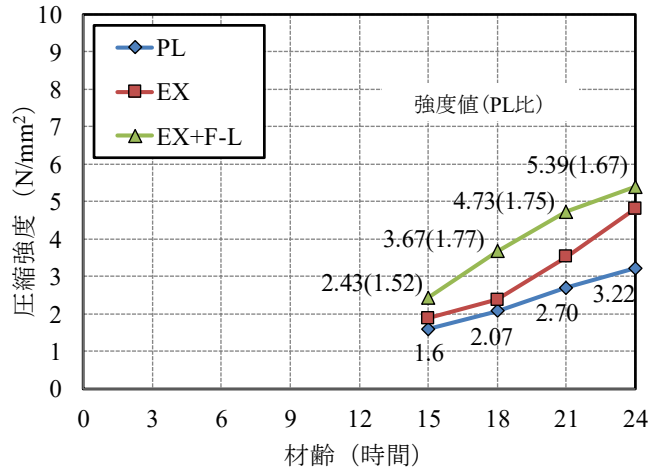


図 8 若材齢強度試験結果

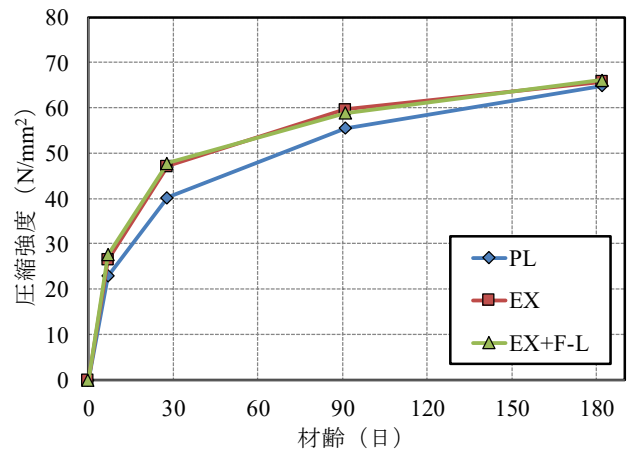


図 9 圧縮強度試験結果

##### b) 拘束膨張試験および乾燥収縮試験

本試験において、膨張材使用配合に対して実施した拘束膨張試験では、いずれの配合も、収縮補償用コンクリートの膨張率の規定となる  $4) 150 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$  を満足した (EX:  $214 \times 10^{-6}$ , EX+F-L:  $153 \times 10^{-6}$ )。また、収縮の影響を加味した図 10 より、膨張材を使用した配合においては、ベース配合と比較して、収縮ひずみの抑制が確認された。一方、早強型膨張材と硬化促進剤を併用した「アーリークリート」配合では、早強型膨張材のみを使用した配合に対し、終局ひずみが大きくなっていることがわかる。これは、液状の硬化促進剤をあと添加することで、見かけの W/C が大きくなったため、膨張効果が相対的に小さくなったことに帰結すると考える。

##### c) 凍結融解試験結果

図 11 に凍結融解試験結果を示す。すべての配合において相対動弾性係数 60% 以上を満足し、かつ、配合の違いによる大きな差は認められなかった。このことより、早強型膨張材と硬化促進剤の添加はコンクリートの凍結融解抵抗性に大きな影響を与えないと考える。

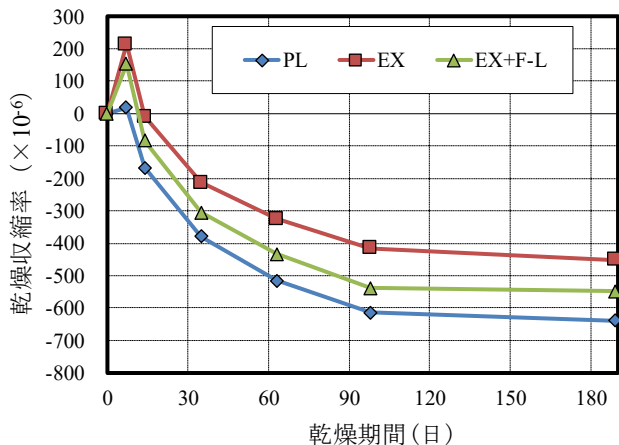


図 10 拘束膨張試験・乾燥収縮試験結果

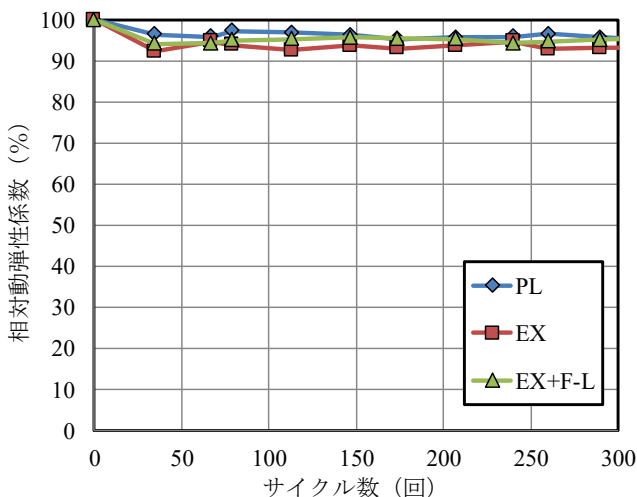


図 11 凍結融解試験結果

d) 透水および透気試験結果

表 14 に透水試験と透気試験の結果を示す。早強型膨張材と硬化促進剤を併用した「アーリークリート」配合では、ベース配合と比較して、透水性および透気性が向上することが分かった。透水性については、EX+F-L の透水比が PL と比較して 0.63 となった。また、透気性については、EX+F-L の透気グレードが PL と比較して「一般」から「良」となった。これらの結果は、図 9 で示したように、材齢初期～中期 (91 日) にかけての強度発現性が向上したことにより、供試体表面の緻密化が図られたことに起因すると考える。

表 14 透水・透気試験結果

	透水量 (g)	透水比	透気係数 (×10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	透気グレード
PL	86.26	1.00	0.110	一般
EX	69.06	0.80	0.046	良
EX+F-L	54.55	0.63	0.061	良

5. 現場適用試験

当社ではこれまで、シールドトンネルと山岳トンネルの自社現場で 1 件ずつ、本工法の試験施工を実施している。以下本章では、これらの適用事例について、現場ごとにその詳細について述べる。

5.1 福岡市八田第 15 雨水幹線築造工事 (3)

本現場は、近年の降雨量の増加により不足する既設幹線の排水能力を補うための新設幹線工事であり、泥土圧式シールド工法により延長 L=666.7m の雨水幹線を築造する工事である。今回適用箇所は、仕上がり内径 φ2,000mm の二次覆工コンクリートであり、立坑からのポンプ圧送となるため、圧送距離が水平換算で約 400m の位置であった。また、本工事では、二次覆工コンクリート全体が長距離圧送となるため、ベース配合をスランプフロー 350~500mm の中流動コンクリート配合としており、流動性の高い配合に対する「アーリークリート」配合適用時の経時保持性および強度発現性について確認した。

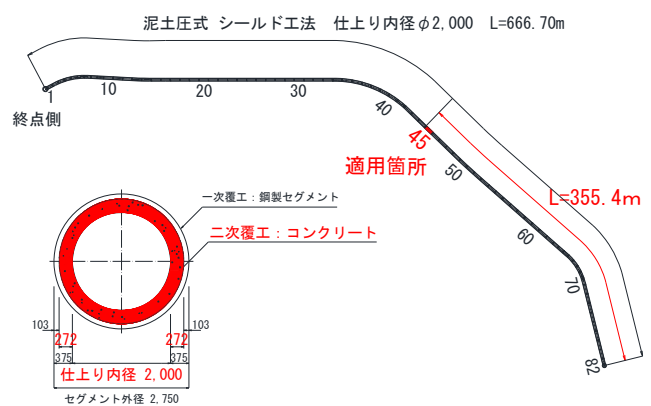


図 12 シールド断面図とセントル割付図

5.1.1 試験概要

(1) 使用材料および使用配合

表 15 に使用材料一覧を示す。また、表 16 に本現場で使用した打設配合を示す。なお、表中、配合 No.1 に記載した現場配合には膨張材が添加されており、比較のため、膨張材と硬化促進剤を添加していないプレーン配合 (No.3) を実機にて練混ぜ、参考値とした。

現場は、最長圧送距離が水平換算で 750m を超える長距離圧送であったため、事前に施工性を考慮して高性能 AE 減水剤 (増粘剤一液型) を使用した中流動コンクリートとしていた。コンクリートの配合は 27.42.5-20N であり、フレッシュ性状の目標値は、スランプフロー 425mm (±75mm)、空気量 4.5% (±1.5%) である。また、現場が住宅密集地に位置し、現場内で硬化促進剤をあと添加することができなかったため、今回工事では、コンクリート工場においてアジテータ車に添加、攪拌後、出荷を行った。

(2) 測定項目および測定方法

表 17 に本現場で試験施工時に実施した測定項目および測定方法を示す。事前検討により、長距離圧送に対する流動性が確保できるか No.1 配合 (現場配合) と No.2 配合 (アーリークリート) の経時

変化特性を確認した上で、試験施工時に各配合の強度発現性について確認した。若材齢強度試験用の供試体は、試料採取後に試験室内(20±3℃)にて気中養生を行った。また、試験施工を行ったNo.2配合については、施工箇所(養生時平均気温:13℃)で気中養生した供試体に対しても併せて若材齢強度試験を実施した。さらに今回は、比較用として早強型膨張材と硬化促進剤を添加していないプレーン配合(No.3)についても同様の試験を行った。

表 15 使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>
膨張材	EX	石灰系早強型膨張材, 密度 3.19 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	玄界灘産海砂, 密度 2.57 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	古賀市谷山産, 密度 2.72 g/cm <sup>3</sup>
	G2	田川市船尾産, 密度 2.70 g/cm <sup>3</sup>
混和剤	F-L	窒素系無機塩化合物, 密度 1.35 g/cm <sup>3</sup>
	Ad	AE 減水剤 (増粘剤一液型)

表 16 コンクリート配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						F-L (kg)
			W	C	EX	S	G1	G2	
1. 現場配合	54.0	52.3	175	324	20	902	435	432	-
2. アーリークリート					-	917			5
3. プレーン (比較用)					-	-			-

表 17 測定項目および測定方法

分類	測定項目	測定方法	
フレッシュ性状	スランプフロー	JIS A 1150	425±75cm
	空気量	JIS A 1128	4.5±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	経時変化 0.30, 60 分
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108	若材齢: 14, 16, 18 時間 材齢: 7, 28 日

## 5. 1. 2 試験結果および考察

### (1) 経時保持特性

図 13 に事前検討時に実機にて実施したスランプフローの経時変化試験結果を示す。試験は現場圧送を考慮して、練上がり直後(0分)と経時変化(練混ぜからの経過時間 30, 60, 90 分)を測定した。No.2 配合(アーリークリート)については、実施工を想定し、練上がり直後に硬化促進剤をアジテータ車にあと添加した(写真4)。試験の結果、「アーリークリート」配合は液状の硬化促進剤をあと添加した影響により、添加直後のスランプフローが平均で 10cm 程度大きくなり、その後のスランプフローの低下量は現場配合よりも大きな結果となった。ただし、両配合とも現場到着相当の経時 30 分以降から練混ぜ後 90 分経過後において所要の流動性を保持しており、現場配合と同様に長距離圧送施工への適用が可能であることが確認できた。

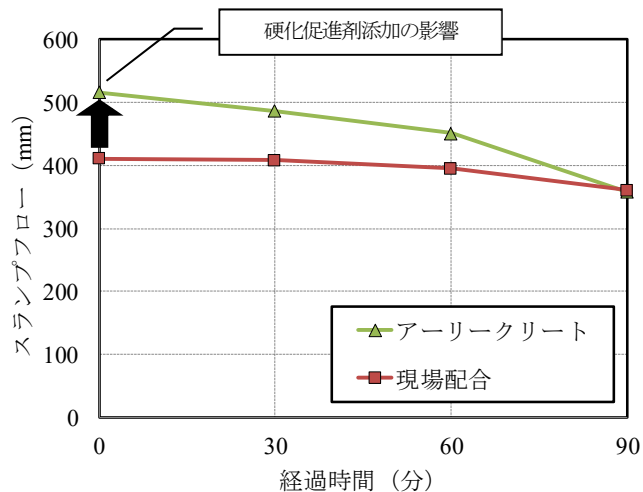


図 13 経時変化試験結果



写真 4 硬化促進剤添加状況

### (2) 圧縮強度試験

表 18 および図 14 に今回試験施工における圧縮強度試験結果を示す。各配合とも材齢 7 日以降の強度については、ほぼ同一であり室内試験と同様の傾向が見られた。また、「アーリークリート」配合の若材齢強度は PL と比較して 1.7~2.6 倍であった。また、図 15 に積算温度で比較した若材齢強度試験結果を示す。図より、「アーリークリート」配合において試験室内で気中養生した供試体と現場環境で気中養生した供試体には概ね相関関係が認められた。これは、混和材料の反応に関して温度依存性があり、養生条件の異なる「アーリークリート」配合における強度発現についても、概ね積算温度での管理が可能であることが確認できた。

表 18 圧縮強度試験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

配合名	14h	16h	18h	7 日	28 日
現場配合	2.13	3.45	4.76	34.2	45.3
アーリークリート	3.43	4.79	6.20	32.8	42.9
アーリークリート(現場養生)	2.19	3.43	4.68	33.3	43.7
プレーン (比較用)	1.32	2.45	3.65	31.6	42.9



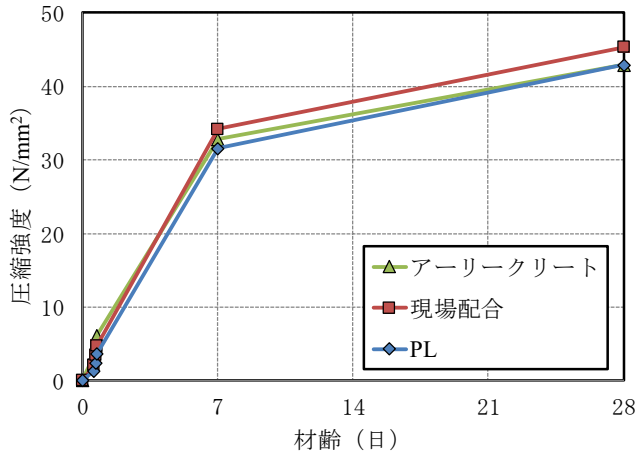


図 14 圧縮強度試験結果

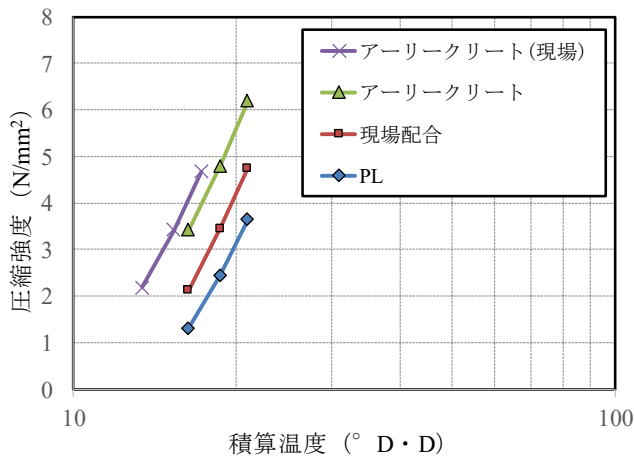


図 15 若材齢強度試験結果 (積算温度による比較)



写真 5 二次覆工コンクリート打設完了

## 5.2 福島県道路橋りょう整備 (再復) 工事 (トンネル)

本現場は、沿線住民の生活を支える幹線道路のうち、急カーブ、急勾配に加え、冬期間の雪崩等の危険性から通行止めとなり、道路交通上の大きな障害となっている峠部を解消するための道路トンネル工事 (L=2,265m, A=50m<sup>2</sup>, 幅員=6.0m) である (写真 6 参照)。冬期は積雪もあり低温環境となるため、コンクリートの脱型強度確保のため通常施工時には技術提案により加温セントルを用いた給熱養生を行っている。今回適用箇所は、坑口から 350m 付近の位置にあり、覆工厚が 300mm の支保パターンが CII の覆工コンクリートである。本工事では、低温環境となる 3 月に試験施工を実施し、給熱養生等の特別な養生を行わずに「アーリークリート」配合を使用することによる初期の強度発現性を確認した。



写真 6 トンネル坑口

### 5.2.1 試験概要

#### (1) 使用材料および使用配合

表 19 に使用材料一覧を示す。また、表 20 に本現場で使用した打設配合を示す。本現場は、使用するコンクリート工場からの距離が遠く、さらに、冬期は積雪による通行止めの影響で現場までの運搬に 60 分以上の時間を要する。そのため、事前に配合検討を実施し、運搬ロスを見込んだうえで施工性が確保できるコンクリート配合 (27-18-25N) への配合変更を行った。今回適用した「アーリークリート」配合は、現場配合に対して細骨材置換えで早強型膨脹材を 20kg/m<sup>3</sup> 添加したコンクリートをコンクリート工場から出荷し、現場到着後、硬化促進剤をアジテータ車にあと添加したうえで打込み作業を行った。

#### (2) 測定項目および測定方法

表 21 に本現場で試験施工時に実施した測定項目および測定方法を示す。フレッシュ性状試験については、コンクリートの現場到着時と硬化促進剤添加後の経時変化 (添加後 0, 60, 90 分) を測定し、硬化促進剤添加後の目標フレッシュ性状をスランブ 18cm (±2.5cm)、空気量 4.5% (±1.5%) とした。また、若材齢強度については、トンネル坑内において気中養生 (養生温度 10°C) を行い、材齢 18, 20, 22 時間で試験を実施し、材齢 7, 28 日については、標準養生にて強度試験を実施した。

表 19 使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>
膨張材	EX	石灰系早強型膨張材, 密度 3.19 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	下郷町大字落合字ジイゴ坂産, 密度 2.62 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	下郷町大字落合字ジイゴ坂産, 密度 2.62 g/cm <sup>3</sup>
混和剤	F-L	窒素系無機塩化合物, 密度 1.35 g/cm <sup>3</sup>
	SP	高性能 AE 減水剤標準形

表 20 コンクリート配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					F-L (kg)
			W	C	EX	S	G	
1.現場配合	51.0	46.0	170	333	-	817	962	-
2.アーリークリート					20	802		10

表 21 測定項目および測定方法

分類	測定項目	測定方法	
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101	18±2.5cm
	空気量	JIS A 1128	4.5±1.5%
	コンクリート温度	JIS A 1156	経時変化: 現着,
	温度履歴測定	-	添加後 0,60,90 分
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108	若材齢: 18,20,22 時間(気中養生) 材齢: 7,28 日(標準養生)

## 5.2.2 試験結果および考察

### (1) フレッシュ性状および経時保持特性

表 22 にフレッシュ性状の結果を示す。また、図 16 に硬化促進剤添加時を 0 分としたスランプの経時変化特性を示す。コンクリート性状としては、硬化促進剤を添加直後にスランプが 1.5cm 大きくなったものの、添加後 60 分間は目標スランプを確保することができた。しかし、硬化促進剤添加から 60 分を超えるとスランプが大きく低下した状態となった。このことから、「アーリークリート」配合では、硬化促進剤添加後一定の時間が経過すると急激にスランプが低下する傾向がみられるため、事前に経時変化特性を確認する必要があると考える。

### (2) 圧縮強度試験

表 22 に圧縮強度試験結果を示す。ここで、若材齢強度（材齢 18～22 時間）については現場気中養生、材齢 7、28 日については採取後 1 日脱型による標準養生の試験結果とした。また、図 17 に若材齢強度試験時の練上がりからの経過時間と圧縮強度の関係を示す。なお、今回適用現場では、事前のフレーム解析結果より必要脱型強度が 1.3N/mm<sup>2</sup>であった。また、打込み中の坑内温度は 11℃、その後の養生温度は平均 10℃程度であり、「アーリークリート」工法の適用時は加温セントル等の特別な養生は実施していない。図より、このような低温環境下であっても、給熱養生を行わずに 19 時間程度で目標の 1.3N/mm<sup>2</sup>を得られることが確認できた。

表 22 フレッシュ性状の試験結果

配合名	測定項目	添加後			
		現着	0 分	60 分	90 分
アーリークリート	SL(cm)	18.5	20.0	18.0	14.5
	Air(%)	5.3	5.7	5.3	4.5
	CT(°C)	12	12	14	14
	AT(°C)	11	11	11	11

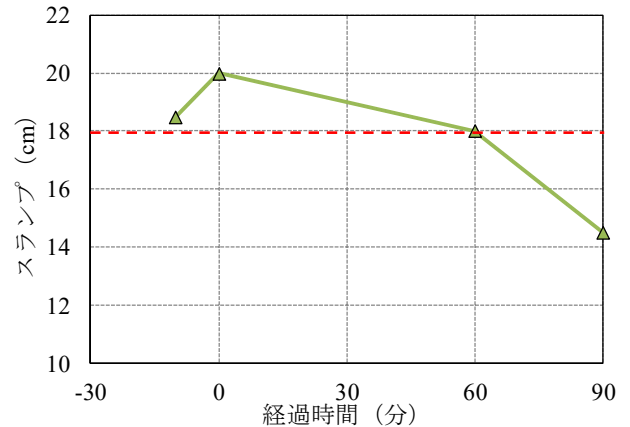


図 16 スランプの経時変化

表 22 圧縮強度試験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

配合名	18h	20h	22h	7 日	28 日
アーリークリート	1.15	1.68	2.69	27.3	40.1

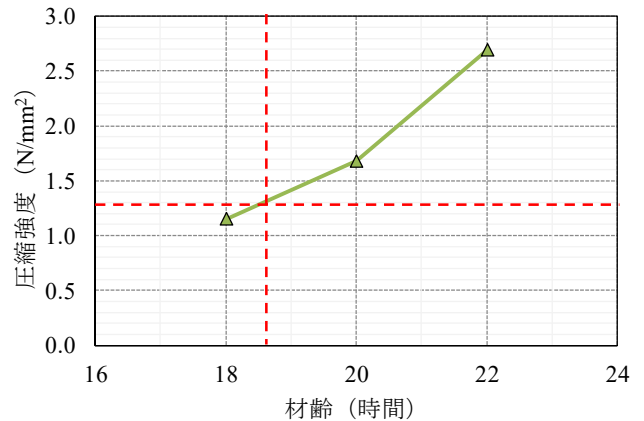


図 17 若材齢強度試験結果

### (3) コンクリート温度

今回適用現場では、セントル型枠に設置した温度センサーによりコンクリートの打込み～脱型までの温度測定を行った。温度センサーにより測定した打込みから脱型までの左肩部のコンクリート温度履歴を図 18 に示す。図より、給熱養生を行っていない「アーリークリート」配合では、通常施工時の給熱養生を行った現場配合と比べて、コンクリート温度が打込み～15 時間程度まで高くなることが確認できた。これは、早強型膨張材と硬化促進剤の添加により水和反応が促進され、水和発熱によりコンクリート温度が上昇した

ものと考えられる。このため、「アーリークリート」配合は、低温環境下であっても特別な養生を行わずに、通常施工時の給熱養生を行った現場配合よりも初期強度の発現が向上することが分かった。

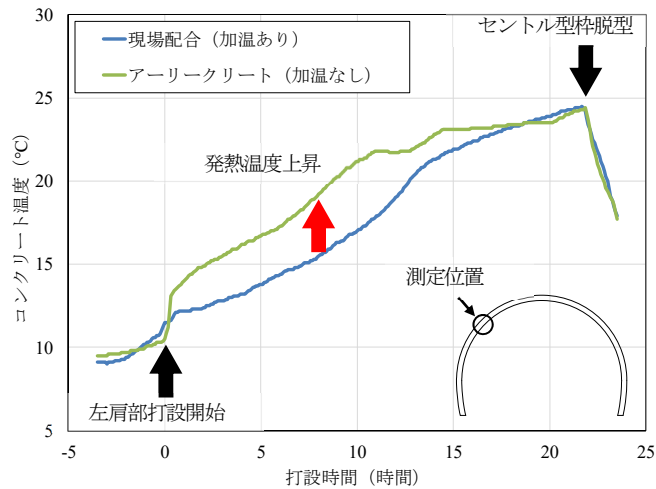


図 18 コンクリートの温度履歴 (左肩部)

## 6. まとめ

### 6.1 室内試験

本試験では、低温環境下において高炉セメント B 種を使用した「アーリークリート」配合、および流動性の高い中流動コンクリートをベースとした「アーリークリート」配合について室内試験を行い、その性状と長期耐久性の確認を行った。

本試験で得られた結果を以下に示す。

- (1) 早強型膨張材と硬化促進剤を併用した「アーリークリート」配合は、低温環境下であっても初期強度の向上が確認できた。また、ベース配合が中流動コンクリートでも初期強度発現性が向上することが確認された。
- (2) 「アーリークリート」配合の強度発現には、温度依存性があり、積算温度による推定が可能であることが確認された。
- (3) 「アーリークリート」配合の初期強度発現は、配合強度に比例し、コンクリートの強度ポテンシャルが大きいほど初期強度の発現性が高くなることが確認された。
- (4) 早強型膨張材と硬化促進剤を併用することで、凝結の始発から終結までの時間が短縮できることがわかった。
- (5) 「アーリークリート」は、初期の強度発現に寄与し、長期にわたり強度発現を妨げない。
- (6) 長期耐久性の試験では、乾燥収縮ひずみが抑制されることが確認でき、また、透気性および透水性の向上が図れた。

### 6.2 現場適用試験

流動性の高い中流動コンクリートをベースとした「アーリークリート」配合によるシールドトンネル二次覆工コンクリートへの試験施工と、低温環境下における山岳トンネル覆工コンクリートへの試験施工を実施した。

本試験施工で得られた結果を以下に示す。

- (1) 液体の硬化促進剤を添加後、一定の時間が経過するとスランプ (スランプフロー) が低下する傾向がみられるが、事前に経時変化特性を確認することで所要の施工性能を確保することが可能である。
- (2) 試験施工においても、早強型膨張材と硬化促進剤を併用することで、初期強度発現が向上することが確認できた。
- (3) 「アーリークリート」のコンクリート温度を計測した結果、ベースとなる現場配合と比較して、初期の温度上昇が確認できた。さらに、給熱養生を行った現場配合と給熱養生を行わなかった「アーリークリート」配合の温度履歴を比較すると、「アーリークリート」配合の方が高くなり、初期強度が向上することが確認できた。

## 7. おわりに

「アーリークリート」は、一般的に強度確保が難しい条件に対して配合面から初期強度発現性を促進させることを目指して開発した工法である。今回、各種室内試験と現場試験施工の結果より、実施工の展開に目途が立ったことから、覆工コンクリートの品質向上を図るための選択肢のひとつとして、今後も幅広く展開を図ってきたい。

### 参考文献

- 1) トンネル標準示方書 山岳工法編・同解説,土木学会,2016,p.193
- 2) 地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法,地盤工学会,2018,p.196
- 3) 土師康一,新谷岳,澤村淳美,田中徹: 環境温度の差に起因する中流動コンクリートの性状変化に関する一考察,第 72 回年次学術講演会,土木学会,2017
- 4) コンクリートライブラリー 75 膨張コンクリート設計施工指針,土木学会,1993.7,p.5