

# 論文 ASR 膨張前に採取したコアの促進膨張試験の結果を基にした残存膨張量の予測に関する研究

見山 宗士郎\*1・山田 一夫\*2・佐川 康貴\*3・川上 隆\*4

**要旨:** コンクリート構造物で ASR が発生した場合、コアを採取し促進膨張試験を行うことで、残存膨張量を評価する。この時に、いつ、どの程度膨張するかといった定量的な予測を行うことが理想的である。本研究では、膨張前のブロックからコアを採取し、両者の膨張率を測定した。コアは複数条件の促進膨張試験を行い、それぞれの結果を用いて 2 つの膨張モデル式を用いて予測を行い、予測結果と屋外に暴露したブロックの膨張を比較した。結果として、予測の結果は全てブロックの膨張率よりも低い値となった。コアの促進膨張はブロックよりも小さくなり、コアとブロックが同じ膨張をするという前提条件に課題があることが分かった。

**キーワード:** アルカリシリカ反応, コア, 促進膨張試験, アルカリラッピング, 残存膨張

## 1. はじめに

コンクリート構造物でアルカリシリカ反応 (ASR) が発生した場合、コアを採取し促進膨張試験を行うことで、構造物の将来の ASR による膨張 (残存膨張量) を評価する。このとき、単にコアの膨張量から ASR が継続するかどうかを判断するだけでなく、経時的な残存膨張を定量評価し、構造性能を予測し、これを基に対策を行うことが理想的である。コアの促進膨張試験から残存膨張量を求める上で、前提条件として (1) 同じ環境ならば、採取コアは元の構造物と同じ膨張をする、(2) 同じ膨張をしない場合、コア採取法や促進条件が不適切、(3) 予測する場合、ASR の原理からの理論予測ができない以上、何らかの経験式を使う、の 3 つが挙げられる。しかし、これらの最適条件化はまだ検証されておらず、残存膨張量の予測を行うための種々の条件を明らかにするべきである。

新設構造物については、事前の促進膨張試験の結果を基に、環境条件などを考慮することで、長期的な ASR 膨張挙動を予測可能である<sup>1)</sup>。しかし、ASR が起きた構造物から採取したコアの促進膨張試験の結果から、将来の構造物の膨張予測を行う際には、同じ材料が入手でき、促進膨張試験を行ったとしても、構造物における ASR の進行度は不明であり、試験による膨張予測曲線のどの点に当てはめればよいか分からないという問題がある。また、残存膨張量評価には、採取したコアが構造物と同様に膨張するという前提があるが、この前提の検証も行われていない。単純に考えてもコア表面では骨材が切断されており、表面から 1 cm 程度の深さの骨材は膨張に寄与しないと予想され、実構造物とは異なる条件になっている。

コアの促進膨張試験として、JCI 規準の JCI-S-011-2017 がある。これは、直径 100 mm、長さ約 250 mm のコアを 40°C、相対湿度 95%以上の環境で ASR を促進する方法である。しかし、この条件ではアルカリ溶脱や供試体の乾燥などの問題があり、構造物の ASR による劣化を過小評価してしまう可能性がある。同じ課題がコンクリートプリズム試験にもあったものの、RILEM AAR-13<sup>2)</sup>で提案されたアルカリラッピング (AW) を適用することでアルカリ溶脱と乾燥を抑制できる<sup>3)</sup>。このことから、コアの促進膨張試験においても AW が有効であることが考えられる。ただし、コアの寸法が直径 100 mm では過密配筋の場合採取できないといった課題もある。

Katayama は直径 56 mm のコアを 1 mol/L の NaOH 溶液に 80°C 浸漬するアルカリ溶液浸漬法を用いて、S 字曲線にフィッティングし、膨張量を温度補正することで、構造物の膨張量を予測する方法を提案した<sup>4)</sup>。しかし、この結果が実際に元のコンクリートの長期的な膨張量と一致しているのかは不明である。そのほかにも種々のコアの促進試験があるが、構造物の膨張挙動と整合するかどうかはやはり明確になっていない。さらにコアの促進膨張試験の結果から元の構造物がいつ、どの程度劣化するかという定量的な予測方法は確立していない。

さらに促進試験結果をどのような回帰式に当てはめて予測するかという課題もある。構造物の ASR による膨張予測モデルとして Larive による提案式<sup>5)</sup> (Larive 式) がある。これは ASR による膨張挙動を S 字の曲線に回帰させることで表現するものであり、Katayama の報告<sup>4)</sup>ではアルカリ溶液浸漬法のような外部から過剰なアルカリを供給するような条件下での促進試験の結果で後述する

\*1 九州大学大学院 工学府土木工学専攻 修士課程 (学生会員)

\*2 国立環境研究所 福島地域協働研究拠点 フェロー 博士 (工学) (フェロー会員)

\*3 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*4 九州大学大学院 工学府土木工学専攻 博士課程 修士 (工学) (学生会員)

Brunetaud による提案式<sup>6)</sup> (Brunetaud 式) を用いた場合、過剰評価になる可能性があることから、コアの促進膨張試験を用いた予測ではこの式が推奨されている場合もある。しかし、Larive 式は ASR 膨張が早期に収束することを前提とした S 字曲線であり、長期的に膨張し続ける場合には適さないと考えられる。AW を用いたコンクリートプリズム試験(AW-CPT)では Larive 式を改良して DEF 膨張に適用した式である Brunetaud 式を用いて構造物の膨張予測を行った例が報告されている<sup>7)</sup>。

以上を踏まえ、(1) 採取コアが元のコンクリートと同じ膨張をするのかという観点から、本研究では ASR が発生する前のコンクリートブロックからコアを採取し、暴露したブロックと促進したコアそれぞれの膨張挙動を測定した。次に、(2) 適切なコア寸法と促進条件の観点から、コアの促進膨張試験を異なる条件で複数行い、促進条件とコアの寸法が膨張挙動に及ぼす影響について検討した。また、(3) 予測方法の適合性の観点から、コアの促進膨張試験の結果から Larive 式<sup>5)</sup>と Brunetaud 式<sup>6)</sup>を使って膨張の予測を行い、両者の予測結果を比較した。コアの予測結果と暴露したブロックの膨張率を比較すると同時に、同配合・同寸法で屋外に 6 年間暴露された別シリーズのブロックの膨張挙動とも比較し、予測結果の妥当性について検討した。

## 2. 試験概要

### 2.1 供試体概要

表-1 に研究に用いたコンクリートの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメント (C, 密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>)、細骨材には非反応性の石灰石砕砂 (S, 密度 2.64 g/cm<sup>3</sup>) を使用した。粗骨材には急速膨張性の安山岩 (Gr, 密度 2.68 g/cm<sup>3</sup>) と非反応性の石灰石 (Gn, 密度 2.70 g/cm<sup>3</sup>) をペシマム混合比として 3:7 で使用した。反応性骨材は既往の研究<sup>7)</sup>で使用された骨材 TO と同じものであり、トリディマイトと火山ガラスを多量に含んでいる骨材である。アルカリ総量は Na<sub>2</sub>O 換算で 5.5 kg/m<sup>3</sup> となるように、粒状 NaOH 試薬を練混ぜ水に溶解させて調整した。

図-1 に作製したブロックの概要図を示す。幅 400 mm、奥行き 400 mm、高さ 600 mm のコンクリートブロックを作製し、材齢 28 日まで型枠を外さずに封緘養生を行った。打設時にブロック内にひずみセンサ ((株) 東京測器研究所 KM-100BT) をブロック上部の断面中央に三方向に埋設した。

材齢 42 日で、コンクリートブロックから φ 100 mm のコアを 4 本、φ 50 mm のコアを 2 本採取した (φ: 直径)。コアは採取後に長さ 250 mm、φ 50 mm は長さ 100 mm と 130 mm になるように調整した。すべてのコアは促進膨張試験の開始まで乾燥を防ぐために遮水フィルムで包ん

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	Gn	Gr	NaOH
50	45	160	320	824	716	307	4.785

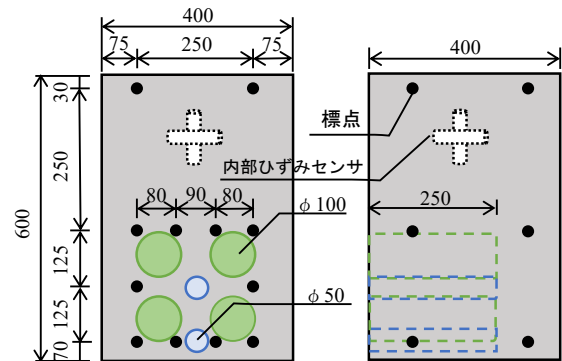


図-1 コンクリートブロック形状寸法 (単位 mm)

表-2 促進膨張試験水準表

水準名	寸法	促進条件	促進温度
φ 100-N	直径: 100 mm	湿空	40°C
φ 100-AW	長さ: 250 mm	AW	
φ 50-AW	直径: 50 mm 長さ: 100 mm	(アルカリ ラッピング)	
φ 50-C	直径: 50 mm 長さ: 130 mm	1 mol/L NaOH 溶液浸漬	80°C

だ状態で 20°C で保管した。

コアの水準は表-2 に示す通りで、各水準名は「φ 直径-促進試験法」とした。なお、N は JCI-S-011-2017、AW は JCI-S-011-2017 に AW を適用したもの、C はアルカリ溶液浸漬法 (カナダ法) を意味する。コア供試体は各水準 2 本ずつ作製し、コアの両側面に標点を取り付けた。

### 2.2 試験手順

AW を行ったものは RILEMAAR-13<sup>2)</sup>を参考に、空隙水中のアルカリ濃度を算出した結果 1.33 mol/L とし、この濃度の NaOH 水溶液を φ 100 では 50.0 g、φ 50 では 12.5 g 含んだ不織布 (日本製紙クレシア、キムテックス ポップアップホワイト、φ 100: 355×425 mm、φ 50: 177.5×212.5 mm) で供試体を包み、その上から遮水性のフィルムで被覆した。φ 100-N と φ 100-AW、φ 50-AW は密閉容器内を湿空状態 (RH>95%) にし、40°C で保管した。アルカリ溶液浸漬法 (C) では、コアを 80°C の恒温槽に 2 時間入れ、ただちに初期値をとった。その後、1.00 mol/L の NaOH 溶液に浸漬し、80°C で促進を行った。φ 100-N、φ 100-AW、φ 50-AW は材齢 341 日目から、φ 50-C は材齢 361 日目から促進を開始した。

測定はコンタクトゲージ法で膨張率の測定と質量の測定を行った。標点間距離は 40°C で促進するものは 50 mm, 80°C で促進するもの (φ 50-C) は 100 mm とした。40°C で促進するものは測定の 24 時間前に 20°C の測定室に移し、測定環境の温度に合わせて測定を行った。φ 50-C は容器から取り出し、供試体の温度ができる限り下がらないようにただちに測定を行った。

なお、φ 100-N と φ 100-AW, φ 50-AW は促進開始から 56 日目で長さ変化の傾向から膨張が収束したと見なし、2 本のうち片方の促進を止めて遮水フィルムで包んで 20°C にて保管したが、促進しているものが再度膨張し始めたので、112 日目から促進を再開した。

コンクリートブロックは、コア採取後、実験室内に材齢 306 日まで静置した。その後、無収縮モルタルで削孔穴の補修を行い、材齢 321 日に九州大学伊都キャンパス内の屋外暴露試験場に設置した。長さ測定器 (ホイットモア型, 測点間距離 250 mm) を用いて表面の膨張率の測定と埋設したひずみセンサを用いて内部のひずみの測定を行った。

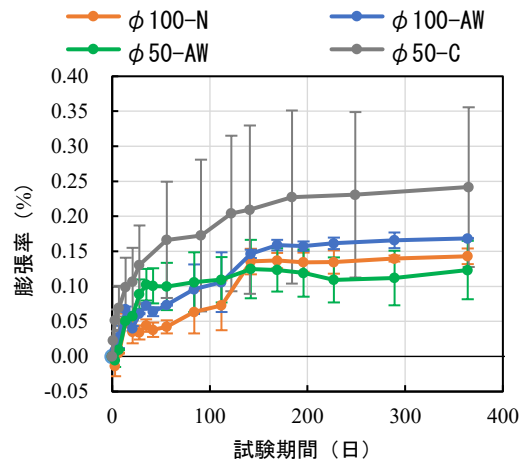
### 3. 試験結果

#### 3.1 コアの促進膨張試験の結果

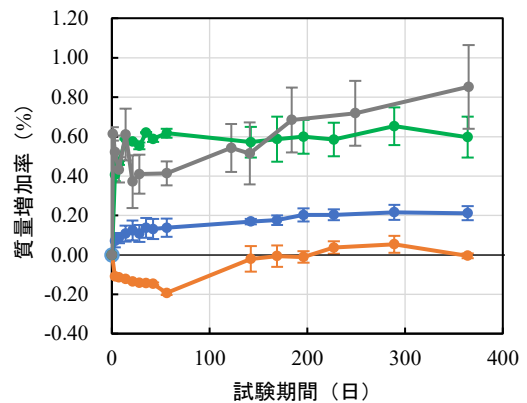
コアの膨張率の経時変化と質量増加率を図-2 にそれぞれ示す。なお、エラーバーは最大値と最小値を示している。

φ 100-N と φ 100-AW を比較すると、AW を適用した方の膨張率が大きくなった。また、促進期間中の質量は φ 100-AW は増加したが、φ 100-N は初期に質量が減少した。これは、φ 100-N は密閉容器内に保存しているのにも関わらず、初期にコア表面が乾燥してしまい、その後も十分な水分が供給されなかったため、膨張率が小さくなり、質量も減少したと考えられる。したがって、膨張率と質量増加率の変化が一般的な傾向と同様であることから AW はコアにおいても有効と考えられる。

次に、φ 100-AW と φ 50-AW を比較すると、初期の膨張率は φ 50-AW の方が大きくなっているが、後から φ 100-AW が追い越した結果となった。また、質量増加率も初期の増加量が φ 50-AW の方が大きくなった。これは、コア寸法が小さい方が内部に早く水分が供給され、早期に膨張するが、早期に反応が収束したと考えられる。寸法が大きい方が内部に保持している反応性骨材の量が多いことから寸法が小さいものよりも継続的に反応することが考えられる。また、コアの φ 50 mm と φ 100 mm の供試体で、膨張率と質量増加率のばらつきを比較すると、φ 50 mm のものは φ 100 mm のものよりも大きなばらつきが生じた。試験 365 日目の膨張率の結果における変動係数を計算すると、φ 100-N が 0.08, φ 100-AW が 0.00



(a) 膨張率



(b) 質量増加率

図-2 コアの促進膨張試験の結果

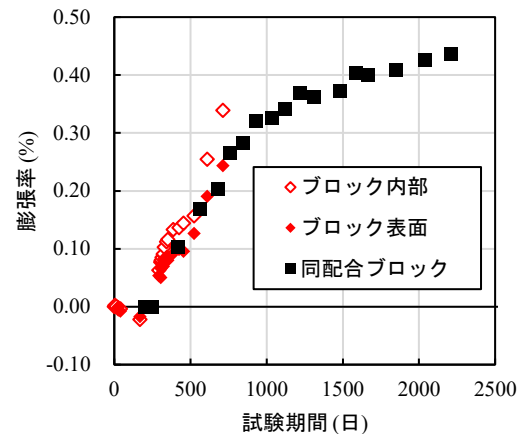
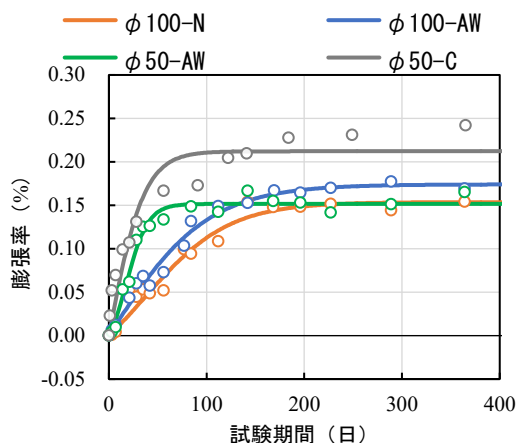
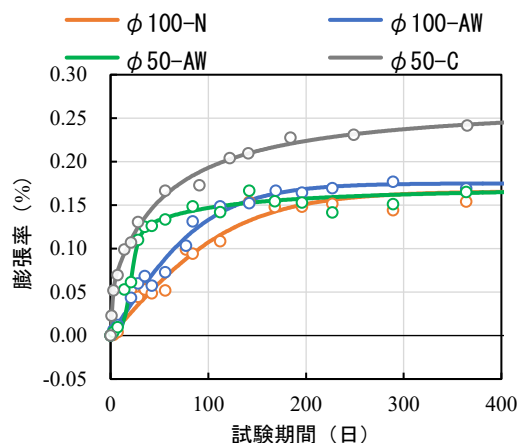


図-3 コンクリートブロックの膨張率

であるのに対し、φ 50-AW が 0.34, φ 50-C が 0.47 となり、寸法が小さい方がばらつきが大きくなる傾向が認められた。これは反応性骨材と非反応性骨材を 3:7 で使用したことにより、骨材の偏在が生じたことが原因の一つとして考えられる。以上より、コアの寸法を小さくする際には 1 本の結果から判断する場合にはばらつきが大きくなる可能性があることに留意する必要がある。



(a) Larive 式へのフィッティング



(b) Brunetaud 式へのフィッティング

図-4 促進膨張試験の結果への各予測式のフィッティング

### 3.2 ブロックの測定結果

図-3 にブロックの測定結果を示す。赤色のプロットがコアを採取したブロックの膨張率で、黒色のプロットが過去に同配合で作製したブロック  $\eta$  の膨張率である。今回作製したブロックはコア採取後、外部からの水分供給を絶って実験室内に保存したため、初期に収縮した。

初期の設置条件の差を補正するため先行事例の初期値を今回の 200 日目に合わせた。両者は同様の膨張挙動であり、再現性があった。したがって、以降のコアの促進膨張試験の結果の評価に同配合・同寸法ブロックの結果も参考値として使用する。

## 4. 残存膨張量の予測

### 4.1 予測手法

コアの促進膨張試験による膨張挙動を、以下のモデルを用いてフィッティングした。本研究では Larive 式 (式 (1)) と Brunetaud 式 (式 (2)) を使用した。その後、アレニウス則を用いて、暴露試験場の最寄りの気象庁データである福岡県前原の年平均気温である 17°C に温度補正した。補正係数は同じ材料・配合を用いた AW-CPT の結果  $\eta$  から算出した。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\infty \frac{1 - \exp(-t/\tau_c)}{1 + \exp\{-(t - \tau_L)/\tau_c\}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\infty \frac{1 - \exp(-t/\tau_c)}{1 + \exp\{-(t - \tau_L)/\tau_c\}} \left[ 1 + \frac{\varphi}{t + \delta} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_t$ : 時間  $t$  における膨張率 (%),  $\varepsilon_\infty$ : 終局膨張率 (%),  $\tau_c \cdot \tau_L \cdot \varphi \cdot \delta$ : 時間を表す定数 (日) である。

### 4.2 促進膨張試験のフィッティング

図-4 に式 (1) および式 (2) にコアの促進膨張試験の

表-3 フィッティング時の各パラメータの値

膨張モデル	水準名	$\varepsilon_\infty$	$\tau_L$	$\tau_C$	$\varphi$	$\delta$
L	$\phi$ 100-N	0.15	43	37	-	-
	$\phi$ 100-AW	0.17	0	50	-	-
	$\phi$ 50-AW	0.15	18	11	-	-
	$\phi$ 50-C	0.21	0	18	-	-
B	$\phi$ 100-N	0.17	65	0	0	84
	$\phi$ 100-AW	0.18	50	0	0	67
	$\phi$ 50-AW	0.17	20	4	23	48
	$\phi$ 50-C	0.27	1	0	45	54

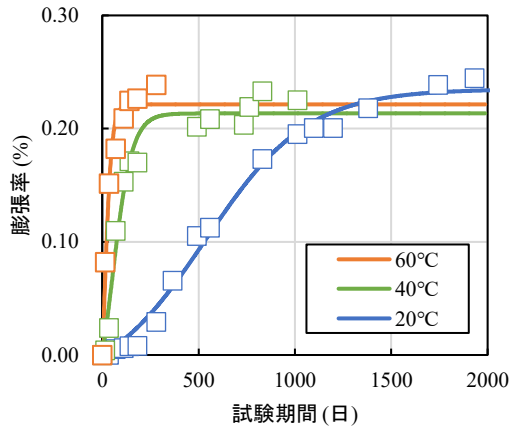
結果を各式にフィッティングさせた結果を示し、各パラメータの値を表-3 に示す。ただし、膨張モデルの記号 L は Larive 式、記号 B は Brunetaud 式を意味する。促進膨張試験の結果は 2 本のうち片方は途中で促進を止めたので、促進し続けたもの 1 体の試験結果を使用した。ただし、 $\phi$  50-C は途中で反応を止めなかったため、2 本の平均値を使用した。

コアの促進膨張挙動に Larive 式と Brunetaud 式をフィッティングさせた結果から、Larive 式では早期に収束する傾向が表われ、Brunetaud 式では長期的に膨張が継続する傾向が表れた。終局膨張量の値は基本的に両者で大きな差は無かったが、 $\phi$  50-C で最も大きな差が出た。

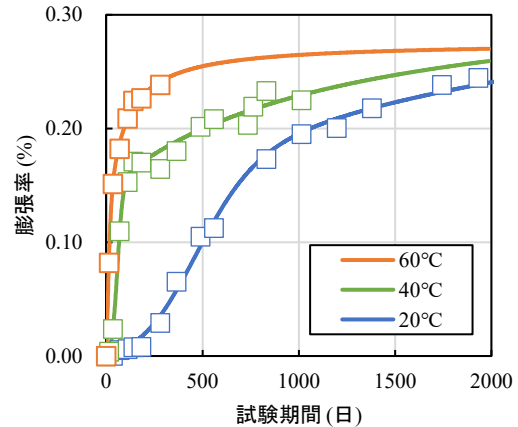
以上より、フィッティング時ではそれぞれの予測モデルの特徴が現れるが、促進膨張試験で膨張が収束したため、 $\phi$  50-C を除いて、両モデルの違いの影響はない。

### 4.3 アレニウス則を用いた温度補正

図-5 に過去の同配合の AW コンクリートプリズム試験  $\eta$  に膨張モデルをフィッティングした結果を、表-4 にその時のパラメータを示す。また、使用したアレニウスの式は式 (3) のとおりである。



(a) Larive 式へのフィッティング



(b) Brunetaud 式へのフィッティング

図-5 同配合 AW-CPT への各予測式のフィッティング

$$\frac{X_{(T_1)}}{X_{(T_2)}} = \exp \left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (3)$$

ただし、 $X$ は各係数、 $U$ は活性化エネルギー、 $R$ は気体定数、 $T$ は温度を表す。なお、各パラメータにおける  $U$  の値は表-5 のようになった。

#### 4.4 ブロックの膨張率との比較

図-6 に Larive 式を用いた予測結果を図-7 に Brunetaud 式を用いた予測結果を示す。両者にはブロックの測定結果も示している。コアの予測結果の始点はブロックの 0 の点と合わせるために、200 日目とした。コアの促進膨張試験の結果からブロックの膨張予測を行ったが、ASR 膨張前に採取したのにも関わらず、全てのパターンにおいてブロックの膨張率よりも小さい結果となってしまった。複数のコアの促進膨張試験において明確な差がないことから、コアと元のブロックが同じ膨張をするという前提を見直す必要があることが考えられる。

Larive 式と Brunetaud 式による予測の結果を比較すると、 $\phi 100\text{-N}$  と  $\phi 100\text{-AW}$  では大きな差はなかったが、 $\phi 50\text{-AW}$  で急速に膨張するまでの時間が長くなった。これはコアの促進膨張試験の時の傾向と異なる結果となった。また、 $\phi 50\text{-C}$  は膨張速度が Larive 式よりも Brunetaud 式の方が初期の膨張挙動が大きいが、長期的には Larive の式の方が早く膨張量が大きくなる傾向となった。これは、長期的に膨張し続けるモデルにも関わらず、 $80^\circ\text{C}$  から  $17^\circ\text{C}$  への温度補正が大きいことから、終局膨張量に至るまでの期間が長くなったと考えられる。Larive 式と Brunetaud 式は早期に膨張が収束するか、長期的に膨張が継続するかという点で異なるが、どちらにおいても本試験では精度の高い予測は行えなかった。また、両者において予測の結果は、全体として大きく異なることは無かった。このことから、予測法に関する問題ではなく、そ

表-4 温度補正のフィッティングの値

膨張モデル	温度	$\varepsilon_\infty$	$\tau_L$	$\tau_C$	$\varphi$	$\delta$
L	20°C	0.23	265	536	-	-
	40°C	0.21	51	52	-	-
	60°C	0.22	19	10	-	-
B	20°C	0.37	428	155	1548	2340
	40°C	0.33	14	57	652	1180
	60°C	0.28	8	2	4	65

表-5 各パラメータの活性化エネルギーの値 (kJ/mol)

膨張モデル	$U_\infty$	$U_L$	$U_C$	$U_\phi$	$U_\delta$
L	1.26	81.0	53.9	-	-
B	6.16	105	60.4	71.7	71.7

もそもコアの促進膨張試験の結果がブロックの膨張率よりも小さくなったことが原因として考えられ、今後さらなる検討を行う必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、コアの ASR 促進膨張試験における試験法と寸法が与える影響を調べるとともに、得られた結果を使って 2 通りの方法で残存膨張量の予測を行った。以下に、本研究の範囲で得られた知見を示す。

- (1) コアの促進膨張試験においてアルカリラッピング (AW) は乾燥による質量減少の抑制に有効であったが、膨張率については大きな差は無かった。
- (2) コアの促進膨張試験の結果に Larive の式と Brunetaud 式を用いてフィッティングし、膨張挙動を表現することはできた。フィッティング時において Larive 式では早期に収束する特徴が、Brunetaud 式では長期的に膨張する特徴が表現された。
- (3) コアの促進膨張試験を用いたブロックの膨張予測

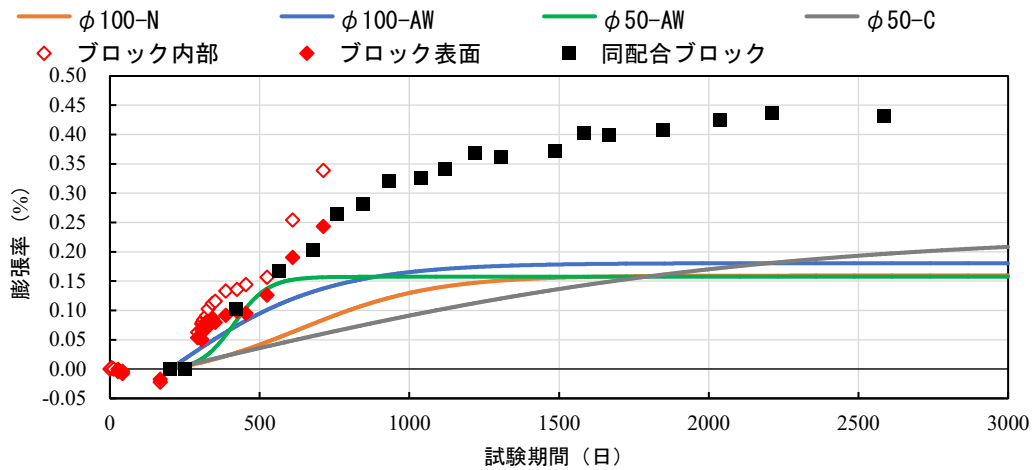


図-6 Larive の式を用いた膨張予測とブロックの膨張挙動の比較

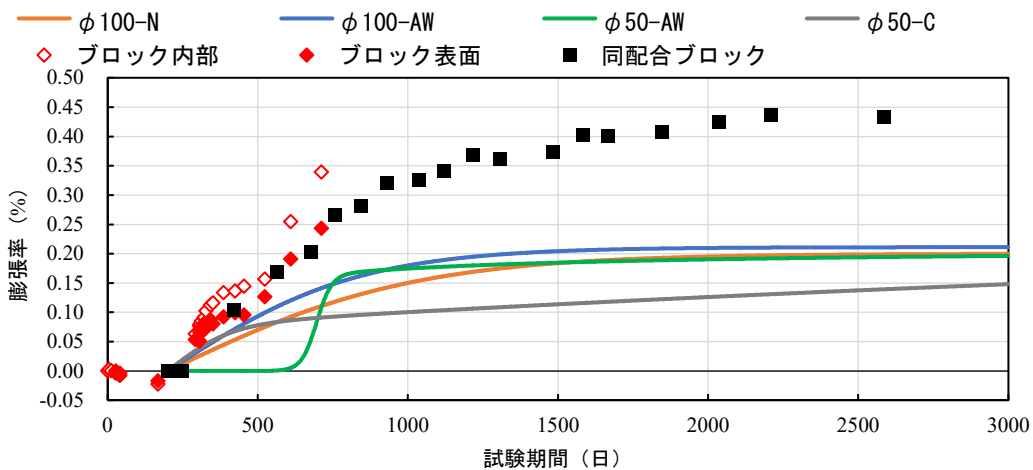


図-7 Brunetaud の式を用いた予測結果とブロックの膨張挙動の比較

では、予測モデルの違いによる大きな差はなかった。また、すべての予測において、暴露したコンクリートブロックよりも膨張率が小さい予測となり過小評価となる傾向が表れた。コアを用いた残存膨張量の予測において、コアと元のブロックが同じ膨張をするという前提条件の再検討を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴: アルカリラッピングしたコンクリートの促進膨張試験に基づく野外暴露コンクリートの ASR 膨張挙動の予測, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.496-502, 2015
- 2) K. Yamada et al.: Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RiLEM AAR-13: application of alkali-wrapping for concrete prism testing to assess the expansion potential of alkali-silica reaction, Materials and Structures, Vol.54, 201, 2021
- 3) Y. Kawabata, K. Yamada, Y. Sagawa, S. Ogawa.: Alkali-Wrapped Concrete Prism Test (AW-CPT) – New Testing

- Protocol Toward a Performance Test against Alkali-Silica Reaction-, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp.441-460, 2018
- 4) Katayama, T.: Accelerated Expansion Test: Japan, Diagnosis & Prognosis of AAR Affected Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 259-ISR, pp.141-173, 2021
- 5) Larive, C. : Apports Combinés de l'Experimentation et de la Modelisation à la Compréhension de l' Alkali Reaction et de ses Effects Mecaniques, Laboratoire Central des Ponts et Chaussée, 1998 (in French)
- 6) Brunetaud, X., Divet, L., and Damidot, D. : Delayed ettringite formation : Suggestion of a global mechanism in order to link previous hypotheses, Proceedings of 7th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, pp. 63-76, 2004
- 7) K. Yamada, A. Tanaka, S. Oda, Y. Sagawa, S. Ogawa, T. Ochiai : Exact effects of temperature increase and alkali boosting in concrete prism tests with alkali wrapping, Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 2016