

# 論文 環境条件の変化を考慮したコンクリートの乾燥収縮のモデル化

椿 龍哉<sup>\*1</sup>・堀江克幸<sup>\*2</sup>

**要旨:** コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート構造物の長期の変形挙動に影響をおよぼす主要な要因の一つである。実際のコンクリート構造物は変動する乾燥条件のもとに置かれているため、乾燥収縮による変形を厳密に求めるためには変動する環境条件を考慮する必要がある。本研究では、周期的に湿度が変動する場合について、小型供試体を用いた実験データおよび既往の実験データをもとに、乾燥収縮のモデル化とその妥当性を検討した。モデル化においては、増分形式のモデルを導いた。

**キーワード:** コンクリート、乾燥収縮、環境条件、モデル化

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート構造物の長期にわたる変形挙動を支配する主要因の一つであるため、乾燥収縮ひずみを精度よく予測することは、構造物の設計上、重要な意味をもつ。実際のコンクリート構造物は、変動する環境条件に置かれるため、予測を精度よく行うためには、予測式に変動する環境条件を考慮する機能があることが望まれる。

変動する環境条件がコンクリートの乾燥収縮におよぼす影響については、最近、いくつかの研究が見られ<sup>1),2)</sup>、環境条件の影響がコンクリートの乾燥収縮におよぼす影響が重要であることを示唆していると思われる。

変動する環境条件における乾燥収縮ひずみやクリープひずみを適切に予測するモデルは現時点では少ない。周期的に変化する環境条件を考慮した予測モデルとしては、Bažant・Wang ら<sup>3)</sup>および Bažant・Kim ら<sup>4)</sup>のものがある。これらのモデルでは、湿度の周期的变化がクリープにおよぼす影響を、既往の実験データをもとに、予測式で平均的に考慮できるようにしている。一方、Al-Alusi ら<sup>5)</sup>は、変動する環境条件における実験データをもとに、クリープと乾燥収縮に対する予測モデルを提案している。この予測モデルは、短

期の荷重を受けるコンクリートの応力ひずみ関係を時間依存変形特性を表すために拡張したものであり、多軸応力状態を含めた複雑なモデルになっている。

そこで、本研究では乾燥収縮ひずみの予測のための CEB 1990 モデル<sup>6)</sup>をもとに、変動する環境条件を考慮できる簡易型の予測モデルの構築を試みる。このモデルでは、一軸の伸縮のみを対象とする。また、鋼纖維の乾燥収縮に対する変形抑制効果についても調べる。

## 2. 変動環境条件下の乾燥収縮の実験

### 2. 1 実験概要

温度と湿度の環境条件が変動する場合のコンクリートの乾燥収縮を調べるために、図-1 に示す供試体を作製した。供試体は寸法が  $10 \times 10 \times 25$ (cm) の直方体である。鋼纖維体積混入率( $V_f$ )は 0% と 2% である。収縮量は埋込型ひずみ計で計測した。埋込型ひずみ計は、供試体内部中央に位置するように埋設した。また、長さ変化はコンタクトゲージでも測定できるように、コンタクトゲージ標点を標点間隔が 10cm になるようにはりついている。

供試体に使用した材料は表-1 に示す。配合は、材齢 28 日における圧縮強度が約  $60 \text{ N/mm}^2$

\*1 横浜国立大学教授 工学部建設学科 Ph.D. (正会員)

\*2 横浜国立大学大学院 計画建設学専攻

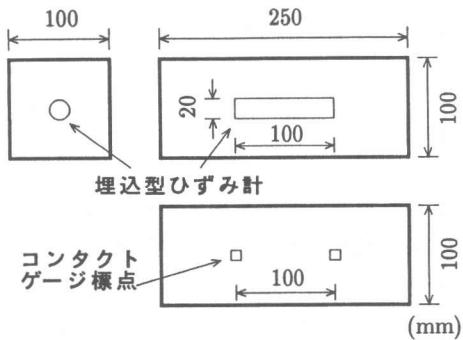


図-1 乾燥収縮測定用の供試体

になるように、水(W),セメント(C),砂(S)の重量比は、W:C:S = 0.3:1.0:1.0とした。セメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂、混和剤としては高性能 AE 減水剤を用いた。供試体内部をできるだけ均一にするため、粗骨材は用いていない。すなわち、ここではモルタルの供試体を用いている。また、鋼纖維は、換算径 0.55mm、長さ 25mm の表面がインデント加工されたカットワイヤーである。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (比重 3.16)
細骨材	川砂 (表乾比重 2.44, 粗粒率 2.45)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (アニオン型 特殊高分子活性剤)
鋼纖維	φ 0.55 (換算径) × 25mm インデント加工付カットワイヤー 引張強度 1000 N/mm <sup>2</sup>

環境条件は図-2 と図-3 に示す 2 種類を検討した。環境条件履歴 1 では、湿度(相対湿度)が一定のもとで、温度が 20, 40, 60°C と変化する変動を与えていた。湿度は 90, 70, 45 (%) と変化する。環境条件履歴 2 では、温度が一定(20°C)のもとで、湿度が 90, 70, 45 (%) と変化する変動を与えていた。

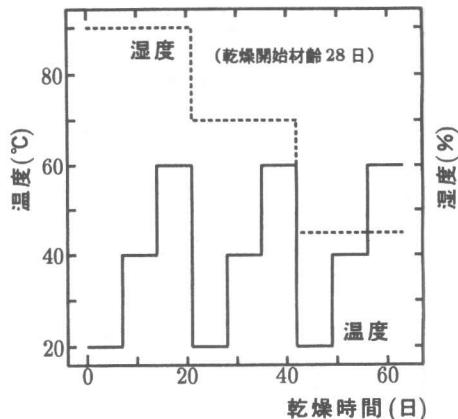


図-2 環境条件履歴 1 の設定

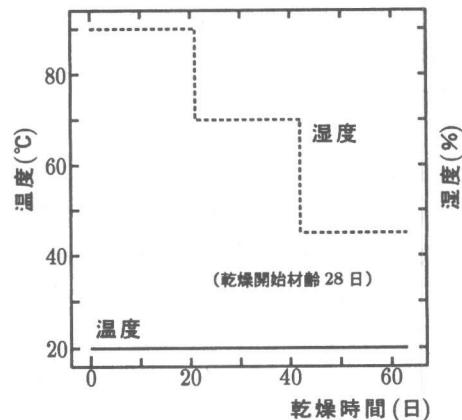


図-3 環境条件履歴 2 の設定

えている。

各々の環境条件履歴において、各環境条件ごとに初めの 1 日は 1 時間間隔、その後各環境条件終了時まで 3 時間間隔で計測した。

## 2. 2 実験結果

材料試験の結果を表-2 に示す。材料試験時の材齢は 28 日である。環境条件履歴 1 と環境条件履歴 2 の実験における材料特性の平均値は、圧縮強度は 63.5 N/mm<sup>2</sup>、引張強度は 4.3 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は  $2.66 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比は 0.25 である。目標強度に達していることが確認され

表-2 モルタルの材料特性

環境 条件 履歴	圧縮 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング 係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポア ソン 比
1	61.2	4.5	2.66 × 10 <sup>4</sup>	0.24
2	65.8	4.1	2.65 × 10 <sup>4</sup>	0.25

る。材料試験には、直徑が 10cm、高さが 20cm (圧縮用) または 10cm (割裂引張用) の円柱供試体を用いた。

各々の環境条件履歴に対する乾燥収縮の測定結果は、図-5、図-6 に示される。これらの図の乾燥収縮ひずみは、計測された全ひずみから埋込型ひずみ計の埋設位置の温度を用いて熱ひずみやその他の温度補正を行って求められた値である。コンクリートの乾燥収縮挙動は、環境条件履歴 1 において湿度一定で温度が増加したとき、また環境条件履歴 2 において温度一定で湿度が減少したとき、乾燥収縮量の増分に増加がみられた。また、鋼纖維を体積率で 2% 混入することにより、乾燥収縮ひずみが抑制されることも確認された。鋼纖維混入による乾燥収縮ひずみの低減率は、全計測期間を通して最大約 10% であった。

なお、図-5、図-6 に示される埋込型ひずみ計による測定結果は、コンタクトゲージによる測定結果と良好な一致を示した。

また、本実験の供試体と同じ供試体を用いて、打設以降、温度 20°C、密封状態で自己収縮<sup>8)</sup>を計測した。計測の結果、自己収縮によるひずみは、本実験の乾燥開始材齢である材齢 28 日までに、材齢 70 日における値の約 90% が発生していることが確認された。

### 3. 乾燥収縮のモデル化

コンクリートの乾燥収縮ひずみの予測のための CEB 1990 モデル<sup>6)</sup>をもとに、温度、湿度、材齢の因子を分離し、それぞれの因子の積で表す予測モデルの構築を試みる。CEB 1990 モデルは次のようにまとめられる。なお、ここでは湿度が 40%

$\leq H < 99\%$ 、温度が  $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 80^{\circ}\text{C}$ 、および普通または早強ポルトランドセメントに対して適用できる部分を示した。

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cs0}^0 \beta_{HT}^0 \beta_t^0 \quad (1)$$

$$\epsilon_{cs0}^0 = \left[ 160 + 10\beta_{sc} \left( 9 - \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$\beta_{HT}^0 = 1.55 \left[ 1 - \left( \frac{H}{H_0} \right)^3 \right] \\ \left[ 1 + \left( \frac{8}{103 - 100 \frac{H}{H_0}} \right) \left( \frac{\frac{T}{T_0} - 20}{40} \right) \right] \quad (3)$$

$$\beta_t^0 = \left[ \frac{\hat{t}/t_1}{\alpha_{st} + \hat{t}/t_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\alpha_{st} = 350 \left( \frac{h}{h_0} \right)^2 \exp \left[ -0.06 \left( \frac{T}{T_0} - 20 \right) \right] \quad (5)$$

ここに、 $H$  は相対湿度 (%)、 $T$  は温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $\hat{t}$  は乾燥時間 (日) である。また、 $f_{cm}$  は材齢 28 日における圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $f_{cm0} = 10 \text{ N/mm}^2$ 、 $\beta_{sc} = 5$ 、 $H_0 = 100\%$ 、 $T_0 = 1^{\circ}\text{C}$ 、 $t_1 = 1$  日、 $h = 2A_c/u$  ( $A_c$ : 乾燥部分の断面積、 $u$ : 乾燥部分の断面周長)、 $h_0 = 100\text{mm}$  である。

乾燥収縮ひずみのための CEB 1990 モデルでは、上式のように、湿度と温度が予測モデルの中に非線形の形で点在しており、その影響がわかりにくい。ここで、湿度と温度の因子を分離するのではなく、それぞれの因子の影響をより端的に把握することができる式の形にするためである。

変動環境条件における乾燥収縮挙動を適切に表現するために、ここでは、乾燥収縮ひずみの時間変化率  $\dot{\epsilon}_{cs}$  が次式で表される増分型モデルを考えた。

$$\dot{\epsilon}_{cs} = \epsilon_{cs0} \beta_H \beta_T \dot{\beta}_t \beta'_H \beta'_T \beta_f \quad (6)$$

ここに、 $\epsilon_{cs0}$  は乾燥収縮ひずみ増分の大きさを決めるための係数である。また、 $\beta_H$ 、 $\beta_T$  は、湿度と温度の影響を表す補正項である。 $\dot{\beta}_t$  は、乾燥収縮ひずみの時間依存性を表すための項である。さらに、 $\beta'_H$ 、 $\beta'_T$  は、湿度と温度の履歴による影響を考慮するための補正項である。 $\beta_f$  は、鋼纖維

混入の影響を表す補正項である。これらの補正項は、以下のように表される。

$$\beta_H = 1 + a_1 \bar{H} + a_2 \bar{H}^2 + a_3 \bar{H}^3 \quad (7)$$

$$\beta_T = 1 + b_1 \bar{T} + b_2 \bar{T}^2 + b_3 \bar{T}^3 \quad (8)$$

$$\bar{H} = H - 60; \quad \bar{T} = T - 20 \quad (9)$$

$$\beta_t = \left[ \frac{\dot{t}/t_1}{350(h/h_0)^2 + \dot{t}/t_1} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$\beta'_H = \begin{cases} c_1 + c_2(H - 90) & (\text{収縮時}) \\ c_3 + c_4(H - 90) & (\text{膨張時}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\beta'_T = \begin{cases} d_1 + d_2 \bar{T} & (\text{収縮時}) \\ d_3 + d_4 \bar{T} & (\text{膨張時}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta_f = \begin{cases} 1.0 & (V_f = 0\%) \\ 0.9 & (V_f = 2\%) \end{cases} \quad (13)$$

式(7)と式(8)では、湿度 60%、温度 20°C を基準として、湿度と温度が乾燥収縮におよぼす影響を湿度と温度の 3 次関数で表している。

式(11)および式(12)では、収縮時と膨張時、すなわち、湿度が減少する場合と湿度が増加する場合とで、補正項を別の形にしている。式(11)は湿度の変動の影響を表すが、湿度が増加するときに起こる膨張を表現するために、膨張時には  $\beta'_H$  が負になるように設定している。式(12)は温度の変動の影響を表すが、膨張時においても、温度が上がることにより、乾燥の傾向が大になることから、膨張の度合が減少するように設定している。これらの湿度と温度の変動に関する項は、供試体の寸法に依存するため、係数  $c_i, d_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) は一般に供試体寸法の関数となる。

式(13)は、鋼纖維混入に対する補正係数であるが、ここで行った実験における鋼纖維混入率の 2% に対して、乾燥収縮が低減された結果を表すものである。

本増分型モデルから、ある時刻の乾燥収縮ひずみの値を計算するには、式(6)を数値的に積分する。ここでは、修正オイラー法を用いている。また、湿度が増加し膨張した後、時刻  $t_s$  に再度収縮が始まる場合は、 $\dot{\beta}_t$  を計算するための乾燥時間  $\dot{t}$  の原点を時刻  $t_s$  に移動している。

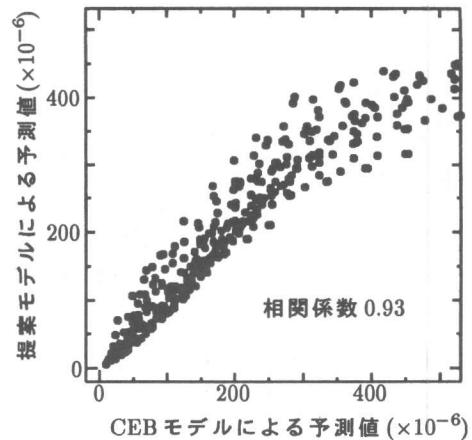


図-4 乾燥収縮ひずみの予測値の相関

#### 4. 乾燥収縮モデルの定数の決定

本モデル化では、まず、乾燥収縮ひずみの予測のための CEB 1990 モデル<sup>6)</sup>を湿度と温度の影響を補正係数  $\beta_H, \beta_T$  により独立に考慮できるように、次のような増分型モデルに変換した。

$$\dot{\epsilon}_{cs} = \epsilon_{cs0} \beta_H \beta_T \dot{\beta}_t \quad (14)$$

これは、式(6)で  $\beta'_H = \beta'_T = \beta_f = 1.0$  の場合に相当する。この過程では、環境条件の湿度と温度の値は一定としている。各々の定数の値は、CEB 1990 モデルの予測値をもとに、最小二乗法により決定した。 $\epsilon_{cs0}, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$  の各定数の値は、表-3 に示される。

CEB 1990 モデルと提案モデルによる乾燥収縮ひずみの予測値の相関図を図-4 に示す。ここでは、環境条件履歴 1 および環境条件履歴 2 で設定した湿度と温度の範囲で、種々の湿度と温度の組合わせについて、設計で対象となる乾燥時間に対する乾燥収縮ひずみを、CEB 1990 モデルと本増分型モデルで計算した結果を比較している。なお、供試体の大きさは、本実験で用いた図-1 に示す寸法を対象にしている。

CEB 1990 モデルと本増分型モデルの計算値の比較により、相関係数は 0.93 と求められた。これより、検討した範囲のパラメータの値に対しては、本増分型モデルと CEB 1990 モデルが適切

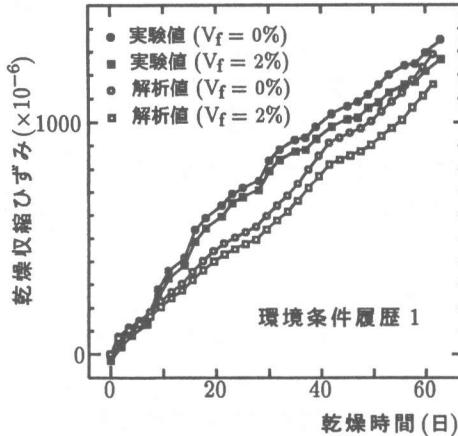


図-5 乾燥収縮ひずみの時間変化  
(環境条件履歴 1)

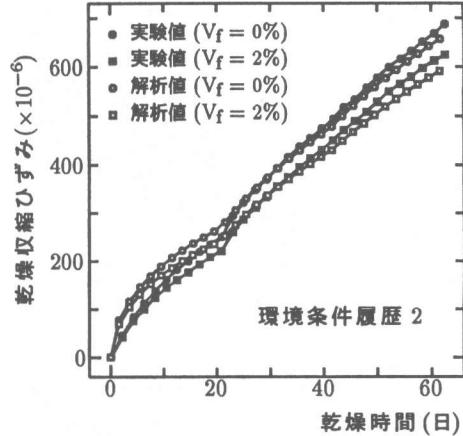


図-6 乾燥収縮ひずみの時間変化  
(環境条件履歴 2)

な精度で一致することが確認された。また、CEB 1990 モデルの乾燥収縮の予測値は、実測値と比べて小さいことが指摘されているが、上記の比較計算でも行われたように、係数  $\epsilon_{cs0}$  の値を適切に選ぶことにより、本増分型モデルは種々の実験値に対応することが可能であると考えられる。

次に、環境条件の変動の影響を、 $\beta'_H$ ,  $\beta'_T$  により補正した。これらの補正項に含まれる定数  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  の値は、実験結果との比較から、表-3 のように決定された。本増分型モデルによる予測値は、図-5, 図-6 に示される。環境条件履歴 1 および環境条件履歴 2 に対して、本増分型モデルが実験結果の傾向を表すことができることが確認される。

さらに、本増分型モデルの適用性を確認するために、Hansen による実験データ<sup>7)</sup>を検討した。ここでは、 $2 \times 5 \times 40\text{cm}$  の直方体の乾燥収縮を測定している。湿度は、50% を 7 日間、70% を 7 日間で 1 サイクルとなる条件設定を繰り返している。温度は  $20^\circ\text{C}$  一定とする。セメントには普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比は 35%，単位セメント量は  $850\text{kg}/\text{m}^3$ 、セメントペーストの容積率は 59% である。また、乾燥開始材齢は 28 日である。この場合の定数は、実験結果をもとに、表-3 のように決定された。

表-3 定数の値

定数	図-5, 6	図-7
$\epsilon_{cs0}$	$1.60 \times 10^{-1}$	$1.60 \times 10^{-3}$
$a_1$	$-1.34 \times 10^{-2}$	$-1.34 \times 10^{-2}$
$a_2$	$-2.30 \times 10^{-4}$	$-2.30 \times 10^{-4}$
$a_3$	$-1.25 \times 10^{-6}$	$-1.25 \times 10^{-6}$
$b_1$	$2.47 \times 10^{-2}$	$2.47 \times 10^{-2}$
$b_2$	$-1.74 \times 10^{-4}$	$-1.74 \times 10^{-4}$
$b_3$	$-1.09 \times 10^{-6}$	$-1.09 \times 10^{-6}$
$c_1$	1.0	1.0
$c_2$	-0.003	-0.01
$c_3$	-	-1.0
$c_4$	-	-0.02
$d_1$	1.0	1.0
$d_2$	0.03	0.03
$d_3$	-	10.0
$d_4$	-	-0.13

実験結果と本増分型モデルの計算値の比較は図-7 に示される。この結果から、Hansen の実験データの乾燥収縮ひずみの測定期間の範囲で、本増分型モデルが湿度が減少および増加する変動条件の場合にも、適用できることが確認される。

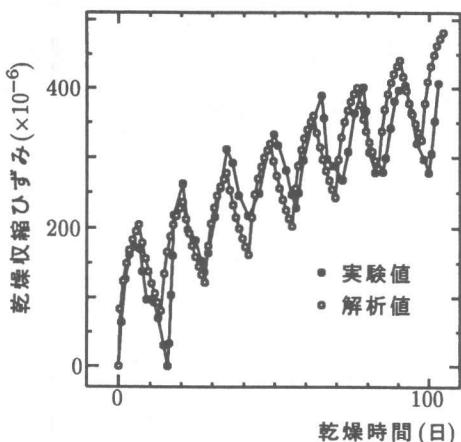


図-7 乾燥収縮ひずみの時間変化  
(Hansen, 1960)

## 5. まとめ

コンクリート構造物が変動する環境条件に置かれている場合の乾燥収縮による変形挙動を正確に予測するための基礎的な検討として、変動する環境条件を考慮できる数学的モデルを構築することを試みた。本研究のまとめは次のようになる。

- (1) 変動環境条件を考慮できる増分型の乾燥収縮の予測モデルを、CEB 1990 モデルをもとに構築した。
- (2) 本増分型モデルは、CEB 1990 モデルに基づくが、湿度と温度のパラメータを分離しており、各々のパラメータの特性を容易に把握することが可能である。
- (3) 湿度と温度の環境条件の変動の影響は、各々のパラメータに関する補正係数により表すことができることを確認した。
- (4) 鋼纖維混入による乾燥収縮の減少は、鋼纖維の混入量を変数とした補正項によって表すことができることを確認した。

以上ように、本研究で提案した乾燥収縮のための増分型モデルは、種々の変動環境条件の場合について対応できることが確認された。今後、材料強度、湿度、温度の変動パターン、供試体寸法等のパラメータに関して、より広い範囲の実験データ

を用いることにより、モデルに含まれる関数の形や定数の値を適切に決定することができると考えられる。湿度や温度の変動パターンの要因としては、変動周期も含まれるが、構造物の寸法や実際の構造物の環境条件を考慮する必要があると思われる。

## 参考文献

- 1) 堀江克幸・椿龍哉: 環境条件変化を受けるコンクリートの乾燥収縮のモデル化、土木学会年次学術講演会講演概要集、V, 1997, pp.1062-1063.
- 2) 綾野克紀・阪田憲次: 実環境下におけるコンクリートの乾燥収縮の予測、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.1, 1997, pp.709-714.
- 3) Bažant, Z.P. and Wang, T.-S.: Practical Prediction of Cyclic Humidity Effect in Creep and Shrinkage of Concrete, Materials and Structures, Vol.18, No.106, 1985, pp.247-252.
- 4) Bažant, Z.P. and Kim, J.-K.: Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 5-Cyclic Load and Cyclic Humidity, Materials and Structures, Vol.25, No.147, 1992, pp.163-169.
- 5) Al-Alusi, H.R., Bertero, V.V. and Polivka, M.: Effects of Humidity on the Time-Dependent Behavior of Concrete under Sustained Loading, Report No. UC SESM 72-2, Struct. Eng. Lab., Univ. of Calif., Berkeley, Calif., 1972.
- 6) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1993, pp.57-58, 65.
- 7) Hansen, T.C.: Creep of Concrete. The Influence of Variations in the Humidity of the Ambient Atmosphere, 6th Congress of the IABSE, Stockholm, Preliminary Publication, 1960, pp.57-65.
- 8) JCI: 自己収縮研究委員会報告書, 1996, pp.195-201, または、超流動コンクリート研究委員会報告書(II), 1994, pp.209-210.