

# 論文 高強度コンクリートの収縮および拘束応力に関する実験的研究

楊 楊<sup>\*1</sup>・佐藤良一<sup>\*2</sup>・許 明<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究は、水結合材比 25%及び 35%の高強度・高流動性コンクリートを対象とし、自己収縮、乾燥収縮及び拘束応力を実験的に検討した。高精度レーザ変位計により打込み直後からのコンクリートの変形計測の可能性を検討した。これに基づき、自己収縮及び乾燥開始材齢を変えた乾燥収縮ひずみを恒温恒湿室においてレーザ変位計で計測した。自己収縮に及ぼす乾燥の影響を調べるため、コンクリートの結合水量を経時的に測定した。さらに、重ね合せを仮定して、鉄筋拘束及び型枠拘束試験方法を用いて自己収縮応力、乾燥収縮応力及び水和熱による温度応力を分離し、それぞれの影響度を明らかにした。

**キーワード:** 高強度コンクリート、乾燥収縮、自己収縮、結合水量、拘束応力

## 1. はじめに

従来、コンクリートの体積変化としては、水和熱による温度ひずみ及び乾燥収縮ひずみについて検討するのが一般的であった。しかし、水セメント比が小さい高強度コンクリートや高炉スラグ微粉末やシリカフェームなどの混和材料を用いたコンクリートで、自己収縮によるひび割れの発生が明らかとなってきた。この自己収縮は、特に高品質化をねらったコンクリートに顕著であるため、大きな問題となる。

このようなことから、自己収縮に及ぼす水セメント比、混和材料の種類と置換率、セメントの種類などの影響が検討されてきたが<sup>1)</sup>、自己収縮に及ぼす乾燥の影響、拘束による収縮応力及び温度応力の発生機構についてまだ十分に研究されていない<sup>2)</sup>。

以上の背景から、本研究は、水結合材比 25%、35%の高強度・高流動性コンクリートを対象として、高精度レーザ変位計による打込み直後からのコンクリートの収縮ひずみの計測可能性を検討し、自己収縮ひずみ及び乾燥開始材齢を変えた乾燥収縮ひずみを温度 20±1℃、湿度 60±5%の恒温恒湿室においてレーザ変位計で計測

した。自己収縮に及ぼす乾燥の影響を調べるため、コンクリートの結合水量を経時的に測った。ともに、鉄筋拘束及び型枠拘束により自己収縮応力、乾燥収縮応力及び水和熱による温度応力を分離し、それぞれの影響度を明らかにした。

## 2. 実験概要

### 2.1 材料及び配合

実験に使用した高強度コンクリートの材料及び配合を表-1、表-2に示す。

### 2.2 実験方法

表-1 使用材料

使用材料	仕様
セメント C	普通ポルトランドセメント; 比重: 3.15; 比表面積: 3220 cm <sup>2</sup> /g
シリカフェーム SF	比重:2.20; 比表面積: 2×10 <sup>5</sup> cm <sup>2</sup> /g; SiO <sub>2</sub> :91%
細骨材 S	鬼怒川産川砂 (安山岩) F.M.:2.69; 比重:2.56
粗骨材 G	鬼怒川産川砂 (安山岩) F.M.:6.68; 比重:2.63
高性能減水剤 SP	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体

\*1 宇都宮大学大学院 建設学専攻 (正会員)

\*2 宇都宮大学教授 建設工学科 工博 (正会員)

\*3 宇都宮大学助手 建設工学科 (正会員)

表-2 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				W	C	SF	S	G	SP(×B)
S25	25	10	41.0	160	576	64	659	966	1.8%
S35	35	10	43.0	165	424	47	747	1009	1.8%

2.2.1 自己収縮及び乾燥収縮

レーザ変位計での計測に用いた収縮実験の供試体の寸法はφ 100×200mm とした。自己収縮供試体の概要を図-1 に示す。供試体の変形を拘束しないように型枠内側の底面，側面にテフロンシートを貼り，温度上昇により膨張の生じることを考慮して，さらに，側面においてテフロンシートと型枠の間に厚さ 2mm の発泡ポリエチレンシートを配置した。打込み後水分の逸散を防ぐため，コンクリートの表面仕上げを行った直後からアルミテープで供試体の端面をシールした。乾燥収縮については，コンクリート

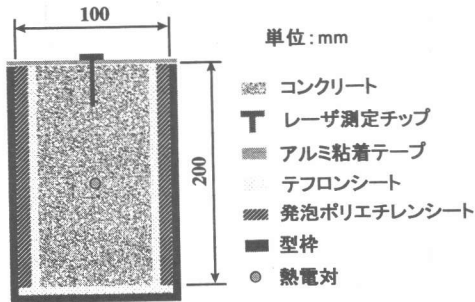


図-1 自己収縮供試体

を直接に型枠に打込んで，端面をシールし，乾燥開始材齢から脱型して，計測した。

レーザ変位計と埋込み型ゲージの比較に用いた供試体の寸法はφ 150×300mm とした。

2.2.2 結合水量

結合水量の測定は所定の材齢において，圧縮試験直後の供試体をハンマー等で破碎し，5 mm の篩を通過したモルタル試料を直ちにアセトンに繰り返し浸せきして，水和を停止させてから，試料（約 40 g）を 105℃ で 12 時間炉乾燥した後，電気炉により 1000℃ で 4 時間加熱して行う。105℃ から 1000℃ の間の質量減少を求め，結合材の質量に対するその減少率を結合水量とする。

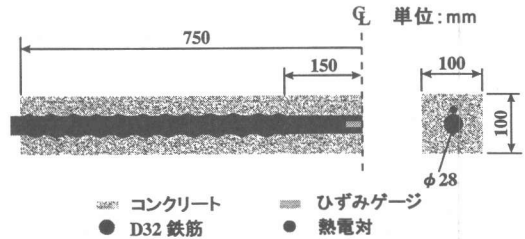


図-2 鉄筋拘束供試体

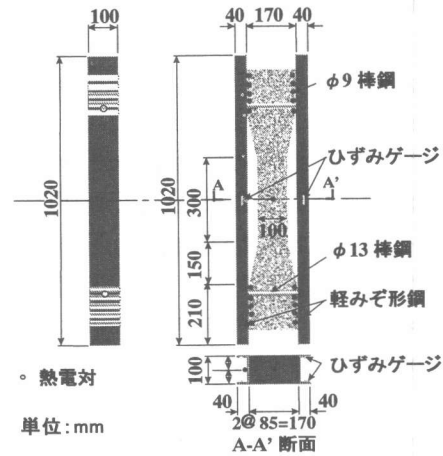


図-3 型枠拘束供試体

2.2.3 拘束応力

鉄筋拘束供試体は JCI 「自己収縮委員会報告書」に準拠し，型枠拘束供試体は JIS 原案「コンクリートのひび割れ試験方法（案）」を参考し，それぞれ図-2，図-3 に示す形状，寸法とした。

表-3 実験項目と条件

実験項目	シール	乾燥開始材齢 (日)		
		0.5	1	3
強度	○	○	○	○
弾性係数	○	○	○	○
結合水量	○	○	○	○
重量変化	○	○	○	○
自己収縮	○			
全収縮		○	○	○
鉄筋拘束	○		○	
型枠拘束	○		○	

\*○：行った実験項目

### 2.3 実験項目と環境条件

実験項目を表-3に示す。

環境温度，湿度：温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ，湿度  $60 \pm 5\%$  とした。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 圧縮強度と弾性係数

図-4，図-5に圧縮強度，弾性係数の実験結果を示す。この図より，高強度コンクリートでは，圧縮強度，弾性係数の発現は初期の段階において極めて速い。セメントの水和進行に及ぼす乾燥の影響のため，シール供試体より乾燥供試体のほうは圧縮強度が小さくなって，乾燥開始材齢が速いほど，W/Bが大きいほどその差は大きくなる。しかし，弾性係数に対して乾燥の影響は小さい。

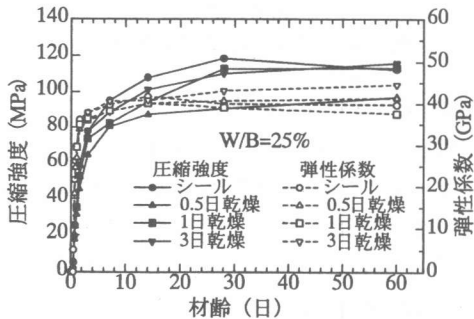


図-4 圧縮強度と弾性係数(W/B25%)

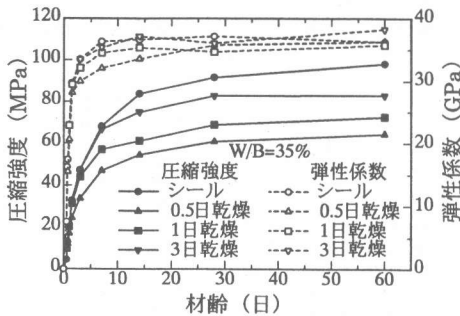


図-5 圧縮強度と弾性係数(W/B35%)

### 3.2 レーザ変位計と埋込み型ゲージの比較

同じ  $\phi 150 \times 300\text{mm}$  の供試体を用い，レーザ変位計と埋込み型ゲージによるコンクリートのひずみの測定結果を図-6に示す。レーザ変位計によるひずみはコンクリートが均一であることを仮定して変位から求めたものであるが，こ

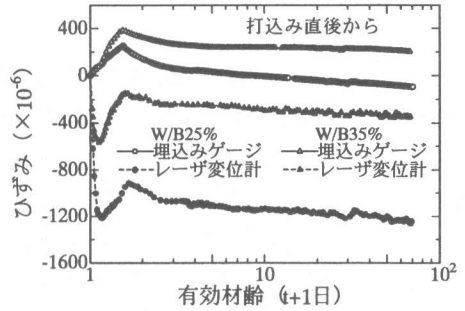


図-6 埋込み型ゲージとレーザ変位計の測定結果の比較

の図より，打込み直後から発生した水和収縮による凝結始発以前のひずみをレーザ変位計で計測できる。これに対して，埋込み型ゲージではこの段階のひずみの測定ができない。両方法を比較すると，極初期におけるひずみの値がかなり異なっているが，しかし，膨張のピークから生じる収縮ひずみの値はほぼ同じであるので，レーザ変位計で打込み直後からコンクリートのひずみの測定が可能であることが示されている。

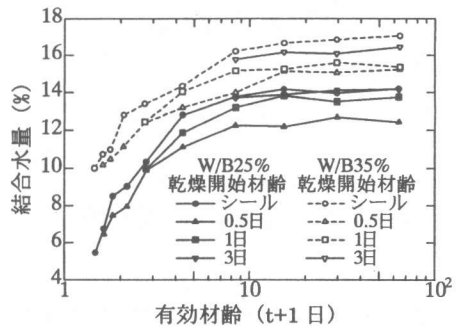


図-7 結合水量に及ぼす乾燥の影響

### 3.3 結合水量

図-7に結合水量の経時変化を示す。W/B25%の結合水量の増大はW/B35%の場合より大きい。しかし，結合材が多いため結合水量の値は35%のそれより小さく，未水和セメントが多いことが分かる。いずれのW/Bの場合でも，乾燥により結合水量は小さくなる。乾燥開始材齢が速いほどシール状態との結合水量の差は大きくなる傾向が見られる。W/B35%の場合と比べ，25%の場合では，材齢3日以後結合水量に及ぼす乾燥の影響は小さい。

### 3.4 収縮

#### 3.4.1 自己収縮

レーザ変位計による自己収縮ひずみの経時変化を図-8に示す。図に示す自己収縮ひずみは線膨張係数を  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  用いて、温度ひずみを補正したものである。また、ひずみの原点は凝結始発に対応するひずみとした。この図より、自己収縮ひずみは、初期材齢に急激に増加した後、徐々に増加する。自己収縮は水結合材比が小さいほど大きい。W/B35%の場合では、有効材齢 28 日以後、自己収縮はほぼ収束になる、これに対して、W/B25%の場合、自己収縮は進行し続ける傾向がみられる。これは W/B25%の場合、未水とセメントの量が多く、セメント硬化体の空隙径も小さく、水和進行による毛細管張力が卓越するためと考えられる。

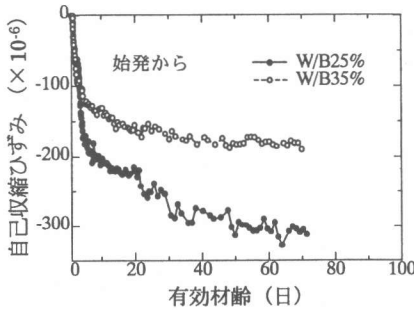


図-8 自己収縮ひずみの経時変化

#### 3.4.2 全収縮

乾燥開始から生じる全収縮ひずみ（自己収縮 + 乾燥収縮）の経時変化を図-9, 10に示す。乾燥開始材齢 0.5, 1 日の場合、W/B の小さいほうは全収縮が若干大きいですが、自己収縮も大きいことを考えると、W/B が小さい場合、乾燥収縮は大きくない。乾燥開始材齢が 3 日の時、W/B25%のほうは全収縮ひずみが小さい。これは W/B の小さいほうが水和進行は速いためと考えられる。全収縮ひずみの進行速度をみると、W/B の異なりにも関わらず、測定期間 60 日までほぼ同じ傾向を呈している。これは自己収縮と乾燥収縮に及ぼす W/B の影響が逆のためと考えられる。

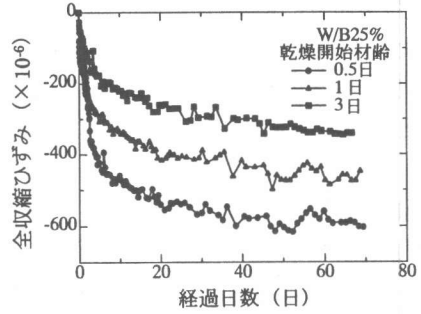


図-9 全収縮ひずみの経時変化

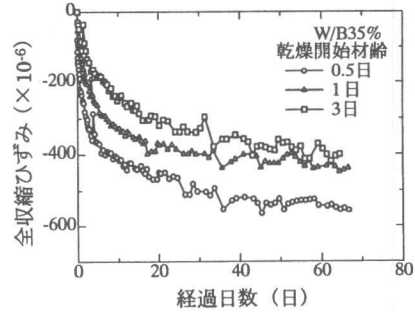


図-10 全収縮ひずみの経時変化

#### 3.4.3 収縮ひずみの分離

高強度コンクリート場合、水和進行が速いため、多くの研究者は自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの重ね合わせが成り立つものと仮定して、両ひずみを分離している<sup>3)</sup>。しかし、前述のような水和に及ぼす乾燥の影響を考えると、特に、初期乾燥を受ける場合、この仮定は成り立つかと疑問になる。ここで、シール供試体の自己収

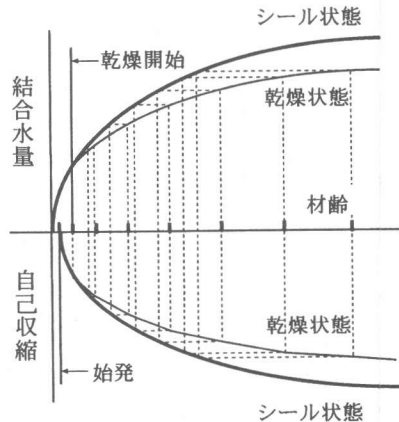


図-11 乾燥状態の自己収縮を求める概念

縮みずみと結合水量および乾燥させる供試体の結合水量の経時的な測定結果を用い、自己収縮は結合水量で決まることを仮定して、乾燥を受ける供試体の自己収縮ひずみを求める。この方法の概念とその結果はそれぞれ図-11、図-12及び図-13に示す。

図-12、図-13より、乾燥を受ける状態の自己収縮ひずみ（材齢0.5日から生じるもの）はシール状態の自己収縮ひずみより小さい。乾燥開始材齢は遅いほどこの差は小さくなる。W/B25%、乾燥開始材齢3日の場合、両ひずみの差はほぼ無視できる。従って、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの重ね合わせに基づいて、乾燥状態の全ひずみから自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを分離するとき、自己収縮ひずみを過大評価する。3日以後、乾燥を受ける場合、この重ね合わせ原理はほぼ適切と考えられる。

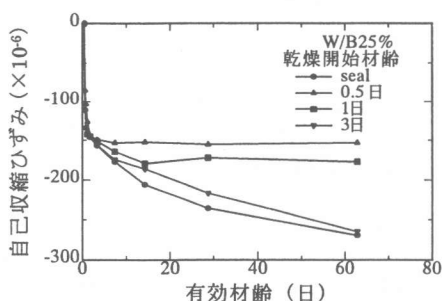


図-12 自己収縮に及ぼす乾燥の影響

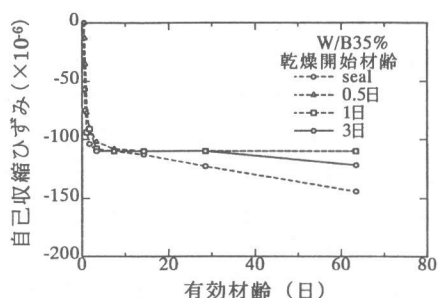


図-13 自己収縮に及ぼす乾燥の影響

### 3.5 拘束応力

W/B25%のコンクリート供試体の拘束応力の実験結果（応力発生時を原点とする）を図-14～図-17に示す。乾燥の場合、乾燥開始材齢は1日としたものである。ここで、シール状態の

鉄筋拘束供試体による自己収縮応力を求める。シール供試体と乾燥させる供試体に生じる応力との差は乾燥収縮応力、鉄筋拘束と型枠拘束供試体に生じる応力の差は温度応力として、拘束応力（以下、全応力）から自己収縮応力と乾燥収縮応力および温度応力をそれぞれ分離する。

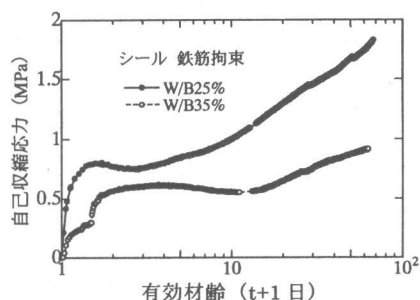


図-14 自己収縮応力の経時変化

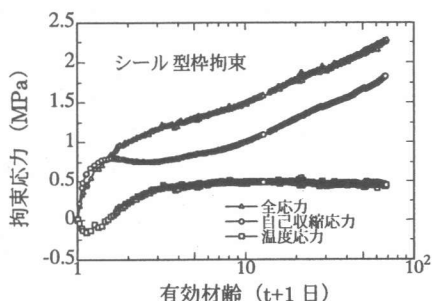


図-15 拘束応力の分離（シール、型枠拘束）

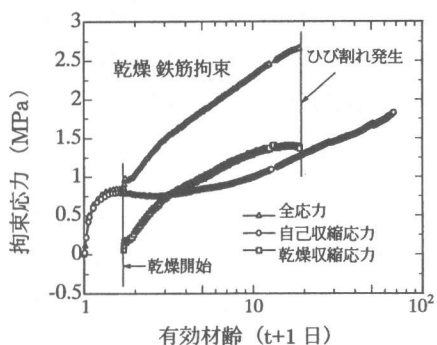


図-16 拘束応力の分離（乾燥、鉄筋拘束）

これらの図より、鉄筋拘束、型枠拘束の何れの場合でも、乾燥を受けるほうが拘束応力は大きく、乾燥の影響がみられる。W/B25%の場合、乾燥を受ける鉄筋拘束供試体は19日でひび割れが発生、型枠拘束供試体は18日で発生した。35%の場合、鉄筋拘束供試体と型枠拘束供試体

ともに13日でひび割れが生じた。

鉄筋拘束供試体と型枠拘束供試体の拘束応力を比べると、コンクリートと型枠の温度差が生じるため、型枠拘束のほうは全応力が大きい。

表-4はW/B別で各ケースの応力成分をひび割れ発生時点での値をまとめたものである。これにより、W/Bが小さいほど全応力が大きい、シールの場合では、W/B35%の供試体の拘束応力はW/B25%のそれの約1/2である。これは自己収縮の影響と考えられる。乾燥の場合、W/B

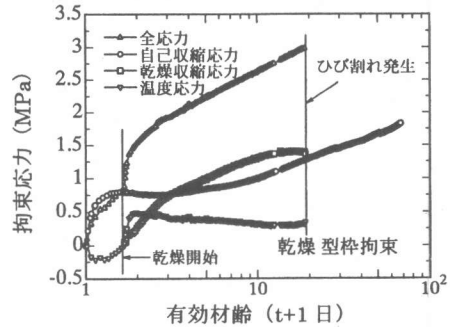


図-17 拘束応力の分離(乾燥、型枠拘束)

表-4 拘束応力成分及びその割合

供試体及び状態		全応力 (MPa)	自己収縮応力 (MPa)	乾燥収縮応力 (MPa)	温度応力 (MPa)
W/B25%	シール	1.77 (100) *	1.28 (72)	—	0.49 (28)
	乾燥	2.99 (100)	1.28 (43)	1.36 (45)	0.35 (12)
W/B35%	シール	0.79 (100)	0.53 (67)	—	0.26 (33)
	乾燥	2.28 (100)	0.53 (23)	1.55 (68)	0.20 (9)

\* 括弧内の値は全応力に対する百分率

による拘束応力の差はそれほど大きくない。これはW/B35%の場合は乾燥収縮ひずみが大きいためである。

各応力成分を比べると、W/Bが小さいほど自己収縮応力、温度応力は大きくなる。25%、乾燥の場合、全応力に対して自己収縮応力は乾燥収縮応力とほぼ同じ比率を占める。

#### 4. まとめ

以下に、本研究の範囲で得られた結果を示す。

- (1) 結合水量に基づく、乾燥下にあるコンクリートの自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの分離方法を提案した。
- (2) (1)に基づき、少なくとも材齢1日以内に乾燥を受ける場合、重ね合わせに基づいて得られた自己収縮ひずみを過大評価されることを示した。しかし、W/B25%の場合、3日以後ほぼ適切と考えられる。
- (3) 水結合材比の相違による拘束応力の差は水分の逸散がない方が、ある場合より大

きく、W/Bが25%、35%のとき、前者は後者の1.38倍であった。

#### 参考文献

- 1) 田澤栄一・宮澤伸吾:セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材及び配合の影響,土木学会論文集, No.502, V-25, pp.43-52, 1994
- 2) Sato, R., Xu, M. and Yang, Y. :Stresses of High Strength Concrete Due to Autogenous Shrinkage Combined with Hydration Heat of Cement, Proceedings: High Performance Concrete, ACI Conf. Malaysia, pp. 837-852, 1997
- 3) 日本コンクリート工学協会:自己収縮委員会報告書, pp.65-66, 1996.11