

論文 高強度コンクリートの収縮に及ぼす乾燥の影響の定量評価について

楊 楊^{*1}・佐藤良一^{*2}・久我英之^{*3}

要旨: 本論文は、水結合材比 25%及び 35%、高炉スラグ微粉末置換率 50%の高強度コンクリートを対象とし、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ及び拘束応力に及ぼす乾燥の影響を実験的に検討したものである。乾燥開始材齢を変えた乾燥収縮ひずみ及び自己収縮ひずみを恒温恒湿室において計測した。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乾燥下にある高強度コンクリートの自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみをそれぞれ分離し、定量評価した。さらに、この結果を用い拘束実験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の分離を行った。

キーワード: 高強度コンクリート、高炉スラグ微粉末、乾燥収縮、自己収縮、結合水量

1. はじめに

自己収縮の生じるコンクリートに及ぼす乾燥の影響は、実験的には、乾燥下の全収縮ひずみから自己収縮ひずみを差し引くことにより便宜的に評価されている¹⁾。また、数値解析的に乾燥下の全収縮ひずみの評価は行われているが、乾燥下の自己収縮ひずみの評価には至っていない²⁾。

乾燥下の自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみと分離し、それらの定量評価を行うためには、収縮ひずみとともに、結合水量、逸散水量、細孔分布とその容積および自由水量等の経時変化を把握する必要がある。さらに結合水量と細孔分布に関連づけて乾燥の影響により低減する自己収縮の機構を明らかにすることが不可欠と考えている。

筆者らは、この考えに立って、シリカフェームを用いた高強度コンクリートの乾燥下の自己収縮ひずみを実測結合水量を用いて評価し、乾燥下の自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみとの分離方法を提案した³⁾。

本研究は、収縮ひずみの成分分離における混和材の影響を明らかにする観点から、高炉スラ

グ微粉末を用いた高強度コンクリートを対象とし、水結合材比 (W/B25%, 35%)、乾燥開始材齢 (1, 3, 7 日) を主たる要因として、乾燥下の自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの定量評価を目的とした。さらに、これらの結果を用い、鉄筋拘束及び型枠拘束実験により拘束応力の各成分の分離を行った。

2. 実験概要

2.1 実験項目と環境条件

実験項目を表-1 に示す。環境温度、湿度は

表-1 実験項目

実験項目	シール	乾燥開始材齢 (日)		
		1	3	7
強度弾性係数	○	○	○	○
結合水量	○	○	○	○
自由水量	○	○	○	○
質量変化	○	○	○	○
細孔構造	○	○	○	○
自己収縮	○			
全収縮		○	○	○
鉄筋拘束	○		○	
型枠拘束	○		○	

注 ○: 行った実験項目

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科 生産・情報工学専攻 (正会員)

*2 広島大学教授 工学部第4類 (建設系) 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 工学部建設工学科

温度 20±1℃，湿度 60±5%とした。

2.2 材料及び配合

高炉スラグ微粉末を混入した高強度コンクリートの材料及び配合を表-2、表-3に示す。

2.3 実験方法

2.3.1 自己収縮及び乾燥収縮

自己収縮及び乾燥収縮実験の供試体の寸法は100×100×400mmとした。

収縮測定装置の概要を図-1に示す。図に示すように、収縮変形に及ぼすブリーディングの影響を排除するため計測方向を水平にし、レー

表-2 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：3.14； 比表面積：3220 cm ² /g
高炉スラグ SF	比重：2.90； 比表面積：6000 cm ² /g (Blaine 値)；
細骨材 S	鬼怒川産川砂 (安山岩) F.M.:2.93； 比重:2.58
粗骨材 G	鬼怒川産川砂 (安山岩) F.M.:6.75； 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

表-3 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	BS/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	BS	S	G	SP(×B)
B25	25	50	41.0	160	320	320	664	973	0.95%
B35	35	50	45.0	167	239	239	783	976	1.05%

ザ変位計と同一供試体に取り付けた埋込型ひずみ計を併用してひずみを測定した。供試体の変形を拘束しないようにJCI自己収縮研究委員会「セメントペースト、モルタル及びコンクリートの自己収縮及び自己膨張試験方法(案)」を参照して自己収縮測定用型枠と供試体との摩擦を極力小さくした。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ラップで覆い、さらにその上に湿布を掛けた。脱型後アルミ箔粘着テープで供試体の全面にシールした。その供試体の概要を図-2に示す。乾燥収縮については乾燥開始材齢から脱型してひずみを経時的に計測した。

2.3.2 結合水量

所定の材齢における結合水量を測定するため、圧縮試験直後の供試体を高さ方向上下約50mmの部分を取り除き、それ以外の部分をハンマー等で破壊した。その後、大きさ2.5~5mmの試料の質量を測定した直後、アセトンに繰り返し浸漬して水和を停止させた。その試料(約60g)を3日間D-乾燥した後、電気炉内において600℃で4時間加熱した。D-乾燥段階での質量減少を自由水量(蒸発可能水量)と考えることができるので、D-乾燥開始から600℃下での

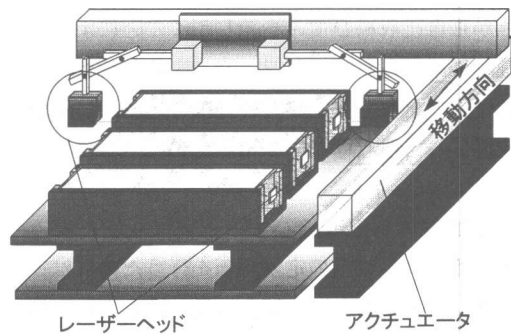


図-1 収縮測定装置の概要

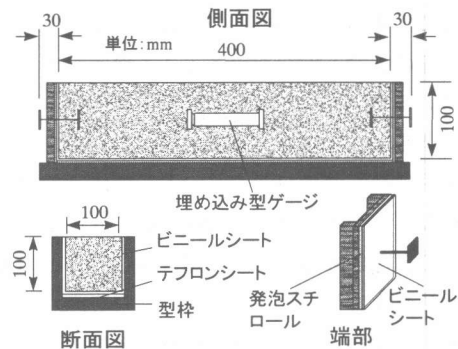


図-2 収縮供試体概要

加熱終了までの間の質量減少を求め、結合材の質量に対するその減少質量の比を結合水量とした。結合材の質量は塩酸により骨材とセメント

硬化体を分離して求めた。

2.3.3 拘束応力

鉄筋拘束供試体は JCI 自己収縮研究委員会「コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)」に準拠したが、後述の型枠拘束供試体と拘束鋼材比を等しくするため、D35 異形棒鋼を用いその中心部 300mm のリブと節を取除き ϕ 30mm の円断面とした。型枠拘束供試体は JCI 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」を参考にし、若材齢での測定ができるようにテフロンシート及び発泡ポリエチレンシートを設置した。これらのコンクリート純断面積に対する鋼材比は約 8% である。

3. 実験結果及び考察

3.1 結合水量

図-3 にそれぞれ W/B25%、35% の結合水量の経時変化を示す。いずれの W/B の場合でも、シール状態と比べ、乾燥により水和反応が阻害され乾燥期間の結合水量は小さくなる。乾燥開始材齢が早く、W/B が大き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。材齢 7 日に開始する乾燥の結合水量に及ぼす影響は小さい。これに対して、シリカフュームを用いた高強度コンクリートの場合、材齢 3 日の乾燥開始で結合水量に及ぼす影響は小さくなる³⁾。これは高炉スラグ微粉末を多量混入した場合シリカフュームを混入した場合より水和反応が遅いためである。

3.2 自己収縮

レーザ変位計と埋込み型ゲージ計を用いた自己収縮ひずみの測定結果を図-4 に示す。自己収縮ひずみの基点は凝結の始発時点ではなく、拘束応力の成分分離のため、応力発生時点にした。図のように両ひずみが概ね一致しており、測定方法による大きな差異はこの場合みられない。

この図より、自己収縮ひずみは初期材齢に急速に増加した後、増加速度は低下するが、材齢 45 日以後も自己収縮は増加する傾向がみられる。自己収縮は水結合材比が小さいほど進行速

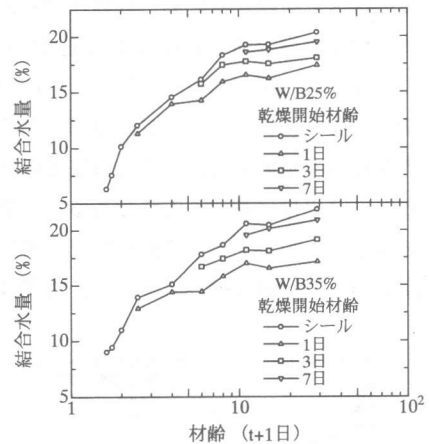


図-3 結合水量の経時変化

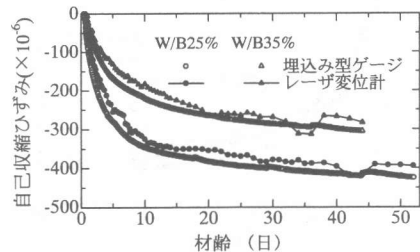


図-4 自己収縮ひずみの経時変化

度が速く、ひずみの値も大きい。材齢 45 日で、W/B35% の約 280×10^{-6} の自己収縮ひずみに対して、W/B25% の方は 400×10^{-6} のひずみに達している。

3.3 乾燥下の全収縮

乾燥開始材齢の異なる乾燥下のコンクリート全収縮ひずみを図-5 に示す。比較のため、同図に自己収縮ひずみも示している。乾燥開始材齢にかかわらず、材齢 45 日において全収縮ひずみは、W/B25% の場合ほぼ 670×10^{-6} 、W/B35% の場合ほぼ 620×10^{-6} となっている。ここで、全収縮ひずみと乾燥開始材齢は必ずしも対応することはなく、W/B35% の場合、3 日及び 7 日の乾燥開始の全収縮ひずみは 1 日乾燥開始の全収縮ひずみより大きく、逆転している。これは若材齢において乾燥を開始した場合、相対的に大きな径の空隙が形成され、空隙に生じる表面張力が大きくないためと思われる。

乾燥の影響を検討するため、収縮ひずみの成分、すなわち乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみを二つの方法で分離する。一つ目は、自己収縮に及ぼす乾燥の影響を無視して両ひずみが独立とする重ね合わせの方法、二つ目は乾燥の影響を受けた結合水量に基づく方法である³⁾。前者は全収縮ひずみからシール状態の自己収縮ひずみを差し引いて乾燥収縮ひずみとし、後者は乾

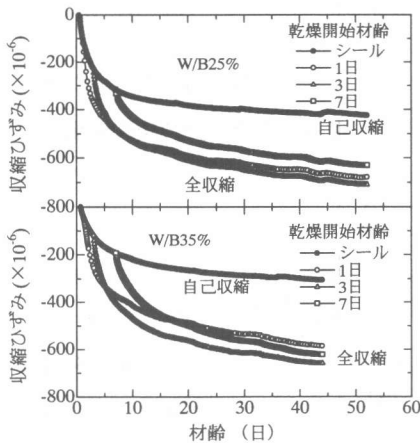


図-5 全収縮ひずみの比較

燥状態の自己収縮ひずみを求め、それを全収縮ひずみから差し引いて乾燥収縮ひずみを求める方法である。これらの結果を図-6、図-7に示す。乾燥開始材齢が早いほど、結合水量から求めた乾燥状態の自己収縮ひずみはシール状態の自己収縮ひずみより小さく、このため乾燥収縮ひずみが大きくなる。いずれのW/Bにおいても、乾燥開始材齢7日の場合、両方法の結果は近くなる。両方法を用いてひずみを分離した結果を表-4に示す。表題の寄与率とは材齢28日における全収縮に対する自己収縮ひずみの割合である。重ね合わせの方法による自己収縮の寄与率は結合水量法による寄与率より大きい。水結合材比が大きくなるとその傾向が卓越するが、水結合材比が小さく、乾燥開始材齢が少なくとも7日の場合には重ね合わせがほぼ成立する。

3.4 拘束応力

鉄筋拘束及び型枠拘束実験の結果を図-8～

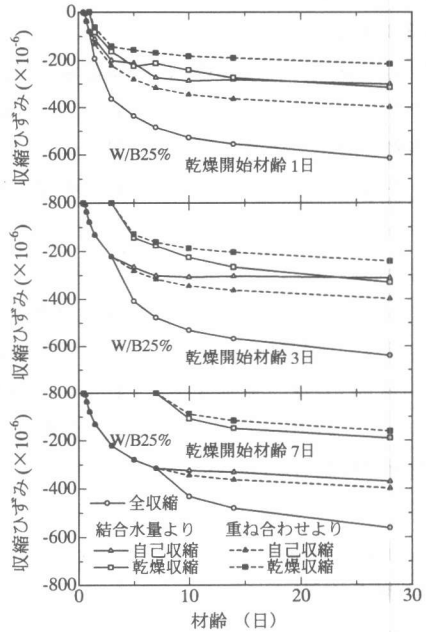


図-6 収縮ひずみの分離(W/B25%)

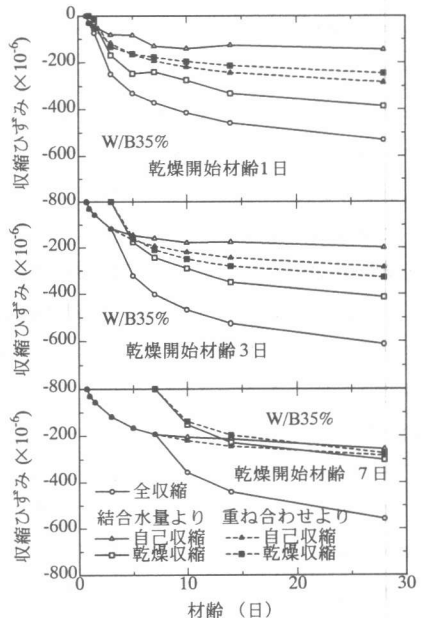


図-7 収縮ひずみの分離(W/B35%)

図-11に示す。これらの結果は全て供試体2体の平均値である。応力発生時の材齢はW/B25%の場合0.46日、W/B35%の場合0.74日である。乾燥下に曝す場合、乾燥開始材齢は

3日としたものである。

シールの場合、W/Bが小さいほど拘束応力が大きい。鉄筋拘束と比べ型枠拘束の場合の拘束応力が若干大きく、若材齢での応力の進行も速い。これは型枠とコンクリートの温度が異なり、温度応力が生じるためである。

乾燥の場合、いずれの拘束方法でもひび割れ

表-4 自己収縮ひずみの寄与率(%)

W/B (%)	分離方法	乾燥開始材齢(日)		
		1	3	7
25	重ね合わせ法	64	62	71
	結合水量法	49	48	66
35	重ね合わせ法	54	46	51
	結合水量法	27	33	46

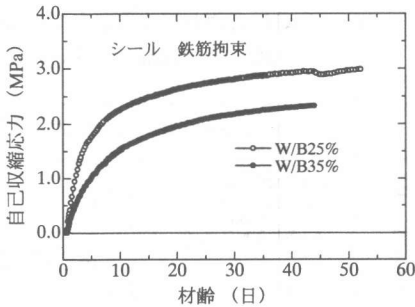


図-8 自己収縮応力の経時変化

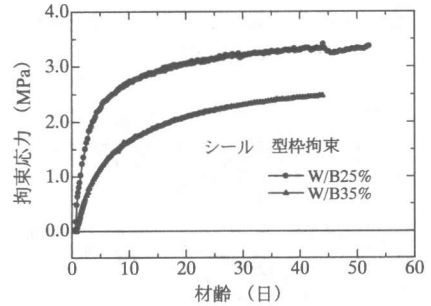


図-9 型枠拘束供試体の拘束応力(シール)

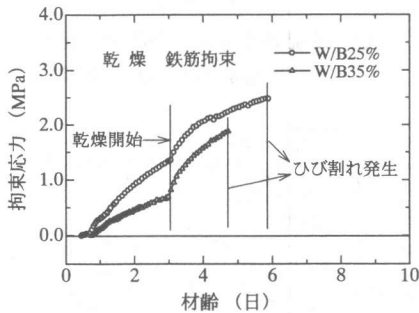


図-10 鉄筋拘束供試体の拘束応力(乾燥)

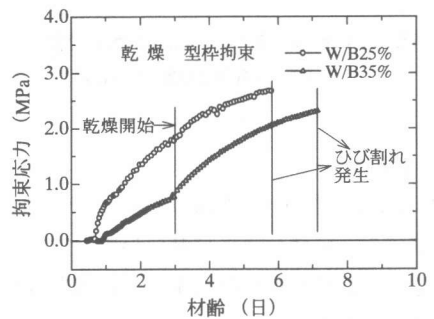


図-11 型枠拘束供試体の拘束応力(乾燥)

が発生した。鉄筋拘束では、ひび割れ発生時の材齢はW/B25%の場合5.9日、W/B35%の場合4.7日で、応力はそれぞれ2.5MPa、1.9MPaであった。これに対して型枠拘束の場合W/B25%およびW/B35%のひび割れ発生材齢は5.8日、7.1日、発生時応力は2.7MPa、2.3MPaであった。ひび割れ生じた時点の応力は型枠拘束のほうが大きい。

次に、全収縮ひずみと同じように拘束応力の成分を分離する。前報³⁾と同様に、重ね合わせ原理による結果を図-12～図-14に示す。この場合、自己収縮ひずみと同様、自己収縮に及ぼす乾燥の影響を無視し、シール状態の自己収縮

応力を乾燥を受ける状態の自己収縮応力としている。これと異なり、結合水量の考えに基づいて得られた自己収縮ひずみと全収縮ひずみの割合を適用し、2種類の拘束方法を用いて型枠拘束を受ける供試体の温度応力、自己収縮応力、乾燥収縮応力を分離した。その結果の一例と重ね合わせの方法で得られた結果を比較して図-15、図-16に示す。乾燥の影響を考慮し、結合水量から算定した自己収縮応力は無視した場合より小さく、乾燥収縮応力は大きくなる。W/B25%、型枠拘束の場合、ひび割れ時の拘束応力の成分の大きさは自己収縮応力、乾燥収縮応力、温度応力の順となっている。

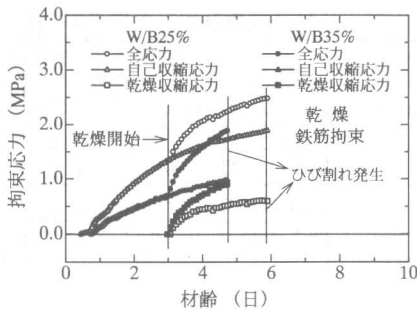


図-12 重ね合わせによる応力の分離 (鉄筋拘束乾燥)

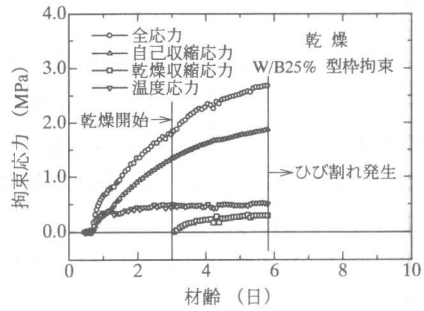


図-13 重ね合わせによる応力の分離 (型枠拘束乾燥 W/B25%)

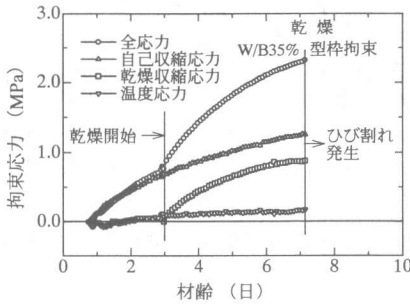


図-14 重ね合わせによる応力の分離 (型枠拘束乾燥 W/B35%)

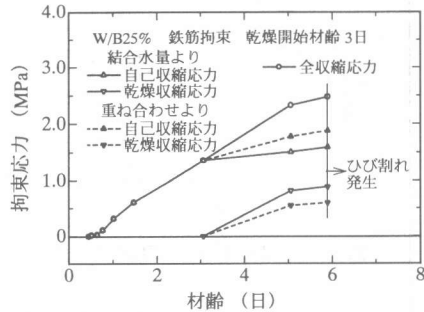


図-15 結合水量による応力の分離 (鉄筋拘束乾燥 W/B25%)

4. まとめ

本研究により以下の結論が得られた。

- 1) ひずみと同様の考えに基づいて、温度、自己および乾燥各外部拘束応力の成分分離方法の提案を行った。
- 2) 重ね合わせ法によるひずみの各成分は、高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートの場合、乾燥開始材齢が7日になると結合水量法による値と近くなる。
- 3) 重ね合わせに基づいて得られた自己収縮応力が過大評価されることを示した。結合水量法によると、JIS 原案型型枠拘束供試体に生じる応力成分は、W/B25%の場合ひび割れ時点において、その大きさが自己収縮応力、乾燥収縮応力、温度応力の順となっている。

参考文献

- 1) 田澤栄一・宮澤伸吾：水和反応によるセメントペーストのマクロな体積減少，セメン

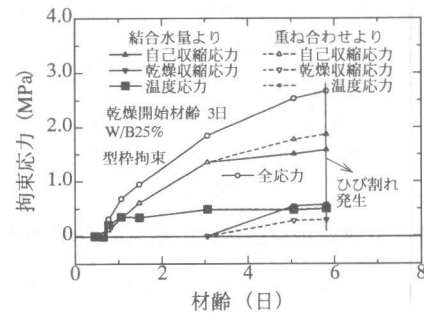


図-16 結合水量による応力の分離 (型枠拘束乾燥 W/B25%)

ト・コンクリート論文集, No.45, pp.122-127, 1991

- 2) 石田哲也・R. P. Chaube・岸利治・前川宏一：微細的機構に基づくコンクリートの自己及び乾燥収縮に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.727-732, 1997
- 3) 楊 楊・佐藤良一・許 明：高強度コンクリートの収縮及び拘束応力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.631-636, 1998