

論文 高流動・高強度コンクリートの収縮性状に関する実験的研究

中江孝士¹・松下博通²・牧角龍憲³・鶴田浩章⁴

要旨：高流動・高強度コンクリートにおける自己収縮、乾燥収縮ひずみに影響を及ぼす要因として、水結合材比、粗骨材品質、スラグ置換率等を挙げ各水準について検討を行った。また養生条件を変化させた場合の収縮試験についても検討を行った。その結果得られた知見は以下の通りである。①水結合材比が小さくなると乾燥収縮に占める自己収縮の割合が大きくなる。②コンクリートの収縮において粗骨材の破砕値は重要な因子であるといえる。③スラグ置換率の増加により乾燥収縮に占める自己収縮の割合は大きくなる。

キーワード：高流動コンクリート、高強度コンクリート、自己収縮、乾燥収縮

1. はじめに

これまでコンクリートの収縮としては、水分逸散による乾燥収縮が注目され多くの研究がなされてきた。しかし近年、高性能A E減水剤の発達、微粉末混和材の使用によるコンクリートの高強度化に伴い、結合材の水和反応に起因する自己収縮が顕著となることが報告されている[1][2]。また高強度コンクリートでは、粗骨材の岩質を変えることにより圧縮強度が変化することも報告されていることから[3]、粗骨材の影響は無視できない。そこで本研究では、高炉スラグ微粉末を混入した高流動・高強度コンクリートの自己収縮、乾燥収縮における水結合材比、粗骨材品質、スラグ置換率等の影響について検討し、同時に養生条件の変化による収縮試験も行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント(比重3.15、比表面積3300cm²/g)、混和材料には高炉スラグ微粉末(比重2.89、比表面積6000cm²/g)、混和剤にはポリカルボン酸系高性能A E減水剤(比重1.04)を使用した。細骨材には海砂(比重2.55、粗粒率2.78)を用いた。なお、今回使用した粗骨材の諸物性を表-1に示す。

表-1 粗骨材の諸物性

記号	岩質	比重	吸水率 (%)	母岩静弾性係数 (GPa)	破砕値(%)
G1	ひん岩	2.79	0.42	73.8	12.2
G2	安山岩	2.71	0.76	62.1	12.7
G3	石英斑岩	2.72	0.50	72.6	13.6
G4	硬質砂岩1	2.73	0.46	80.5	13.8
G5	硬質砂岩2	2.70	0.82	56.0	16.6

表-2 実験1のパラメータ

要因	水準
水結合材比	23、28、33、43%
粗骨材品質	表-1の5種類
スラグ置換率	0、50、75%

*1 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 九州大学教授 工学部建設都市工学科、工博 (正会員)

*3 九州共立大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

*4 九州大学助手 工学部建設都市工学科、工修 (正会員)

2. 2 実験のパラメータ

本実験においては以下の2つの実験を行った。

実験Ⅰ：自己収縮・乾燥収縮ひずみに与える要因別の影響についての検討

実験Ⅱ：養生条件の変化による収縮試験

表-2に実験Ⅰにおけるパラメータを示す。要因は水結合材比、粗骨材品質、スラグ置換率の3種類である。表-3に実験Ⅱのパラメータを示す。封緘養生は、自己収縮供試体と同様にアルミ箔粘着テープで供試体全面をシールした。また収縮供試体はD-1、D-

7、D-28は乾燥収縮試験体、S-1、S-7、S-28、Wについては自己収縮試験体と同様である。

2. 3 配合

実験Ⅰの基準供試体は水結合材比(W/B)を28%、高性能A E減水剤混入率をB×1.0%、スラグ置換率を50%とし、粗骨材にはG4を使用した。実験の配合を表-4に示す。なお実験Ⅱの配合はM28-50-G4とした。また目標フローは60±5cmとした。

表-4 配合表

配合記号 ^{*1}	W/B (%)	s/a (%)	スラグ置換率 (%)	単位量(kg/m ³)					Air (%)	
				W	C	B S	S	G		混和剤
M28-50-G1~G5	28	45.0	50	160	286	286	713	943	5.72	2.5
M23-50-G4	23	41.5	50		348	348	604	943	6.96	
M33-50-G4	33	47.5	50		242	242	787	943	4.84	
M43-50-G4	43	50.3	50		186	186	881	943	3.72	
M28-0-G4	28	45.0	0		572	0	722	953	5.72	
M28-75-G4	28	45.0	75		143	429	707	936	5.72	

*1：配合記号(例)M28-50-G4→水結合材比28%-スラグ置換率50%-粗骨材の種類(G4)

2. 4 供試体作製及び養生方法

図-1に各収縮供試体を示す。自己収縮供試体は10×10×24cmの角柱とし、恒温恒湿(温度20±2℃、湿度60±5%)の室内で発泡スチロール製の型枠の底面にテフロンシートを貼り、打設後の水分蒸発を防ぐために湿布及びビニールシートで打設面を覆った。打設後24時間で脱型し、水分の逸散を防ぐために直ちにアルミ箔粘着テープで供試体全面をシールし、恒温恒湿室内に静置した。乾燥収縮供試体は10×10×40cmの角柱とし、鋼製型枠を使用し、自己収縮供試体

表-3 実験Ⅱのパラメータ

供試体名	供試体の養生方法
D-1	打設(0日) → 脱型(1日) → 気乾養生
D-7	打設(0日) → 脱型(1日) → 水中養生(7日) → 気乾養生
D-28	打設(0日) → 脱型(1日) → 水中養生(28日) → 気乾養生
S-1	打設(0日) → 脱型(1日) → 封緘養生
S-7	打設(0日) → 脱型(1日) → 水中養生(7日) → 封緘養生
S-28	打設(0日) → 脱型(1日) → 水中養生(28日) → 封緘養生
W	打設(0日) → 脱型(1日) → 水中養生

供試体名(例)D-1⇒乾燥開始材齢1日、S-1⇒封緘養生開始材齢1日

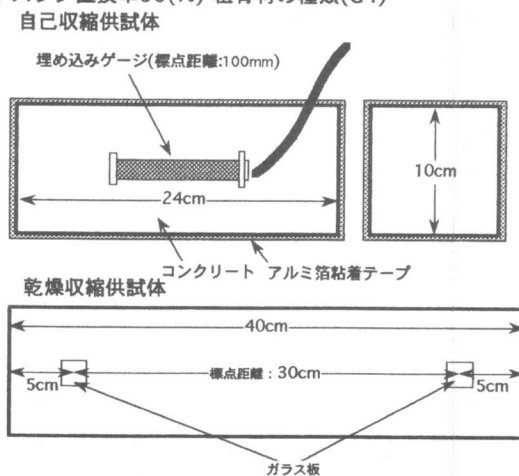


図-1 各収縮の供試体図

と同様に恒温恒湿室内において打設後湿布及びビニールシートで打設面を覆い、脱型後恒温恒湿室内に静置した。

2. 5 測定方法

自己収縮供試体は、埋め込み型ひずみ計 (KM-100B) により測定した。自己収縮の測定では並行して凝結試験を行い、凝結始発時間を自己収縮の原点とした。また自己収縮ひずみは、コンクリートの熱膨張係数を $10.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定し温度補正を行った。乾燥収縮供試体は打設後 24 時間で基長を測定し、基準長を 30cm としてコンパレータ法により測定した。

3. (実験 I) 自己収縮・乾燥収縮ひずみに与える要因別の影響についての検討

実験 I においては、自己収縮供試体と乾燥収縮供試体を同一の養生条件下におくことを基本とし、乾燥収縮ひずみにしめる自己収縮ひずみの割合 (自己収縮/乾燥収縮) を求めることを目的とした。自己収縮ひずみについては凝結始発時間を原点とし、乾燥収縮ひずみについては脱型時を原点としているため、自己収縮/乾燥収縮を求める際の自己収縮ひずみについては乾燥収縮ひずみと同じく脱型時をゼロ点とした。図-2 に実験値 (M28-50-G4) による一例を、図-3 に収縮ひずみの概念図を示す。

3. 1 水結合材比 (W/B) の影響

図-4 に同一経過日数における自己収縮ひずみと水結合材比 (W/B) との関係を示す。W/B が小さくなると、自己収縮ひずみが大きくなっている。図-5 に同一経過日数における乾燥収縮ひずみと水結合材比 (W/B) との関係を示す。自己収縮ひずみとは逆に、W/B が小さくなると乾燥収縮ひずみが小さくなっている。図-6 に同一測定日における、

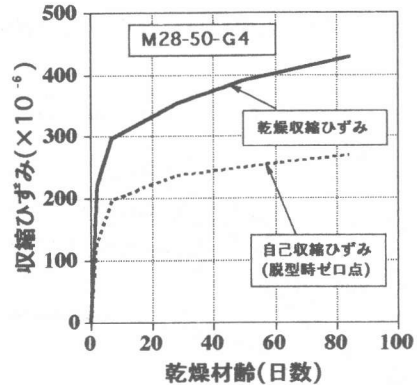


図-2 実験値による一例

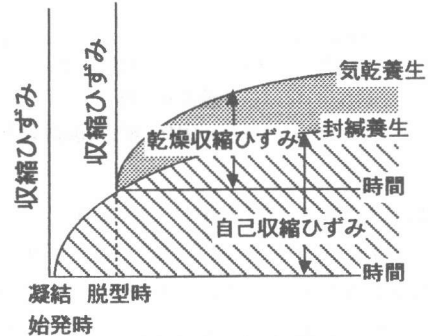


図-3 収縮ひずみの概念図

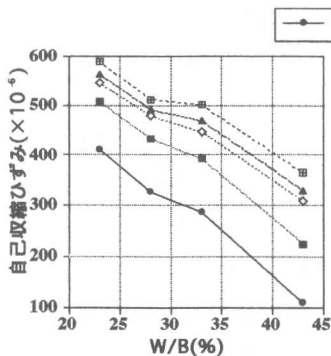


図-4 自己収縮ひずみ(W/B)

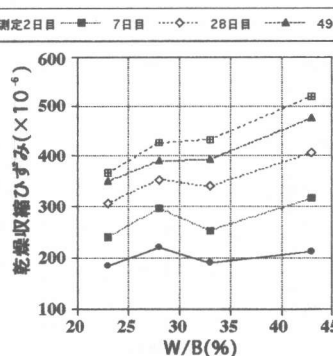


図-5 乾燥収縮ひずみ(W/B)

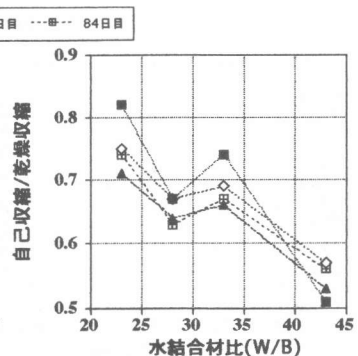


図-6 乾燥収縮に占める自己収縮の割合

水結合材比による乾燥収縮に占める自己収縮の割合を示す。初期材齢を除けば自己収縮／乾燥収縮は材齢によらずほぼ収束しており、またW/Bが小さくなると乾燥収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合が大きくなっている。

3. 2 粗骨材品質による影響

図-7、図-8に粗骨材の破砕値と各収縮ひずみの関係を示す。自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみともに破砕値が小さくなるとひずみが低減されている。本実験において各粗骨材とも単位粗骨材量が一定であることから、コンクリート中における粗骨材の収縮拘束効果と骨材そのものの強さを表す指標である破砕値との間に相関関係がみられた。コンクリートの収縮において粗骨材の破砕値が重要な因子であるといえる。また粗骨材の違いによる自己収縮／乾燥収縮はほぼ一定であることより、乾燥収縮に占める自己収縮の割合に対する収縮拘束の影響はないと考えられる。

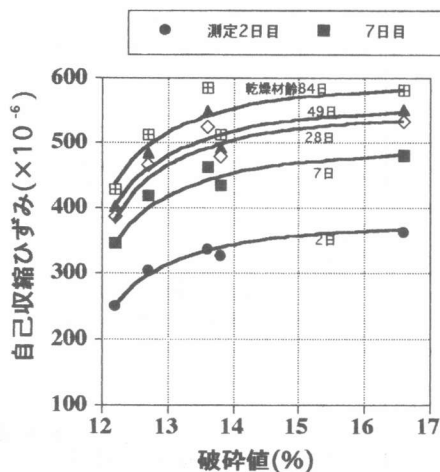


図-7 自己収縮ひずみ(破砕値)

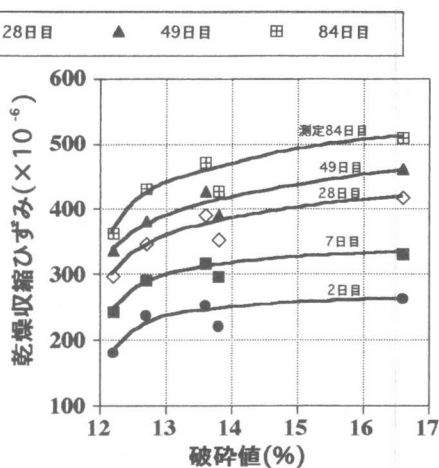


図-8 乾燥収縮ひずみ(破砕値)

3. 3 スラグ置換率による影響

図-9にスラグ置換率の変化による自己収縮ひずみを示す。スラグ置換率が大きくなると自己収縮ひずみが増える傾向がみられた。図-10にスラグ置換率の変化による乾燥収縮ひずみを示す。自己収縮の場合とは逆に、スラグ置換率が大きくなると乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向

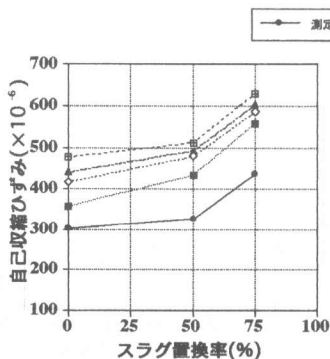


図-9 自己収縮ひずみ(スラグ置換率)

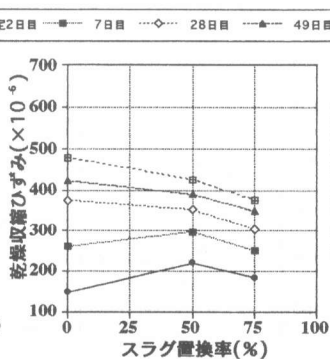


図-10 乾燥収縮ひずみ(スラグ置換率)

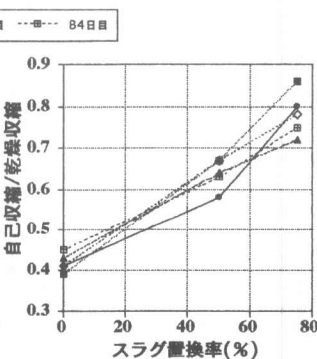


図-11 乾燥収縮に占める自己収縮の割合

がみられた。図-11にスラグ置換率の変化による乾燥収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合を示す。スラグ置換率の増加に伴い、乾燥収縮に占める自己収縮の割合が大きくなっている傾向がみられた。図-12に逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係を示す。乾燥初期においてスラグ置換率の増加により逸散水量も増加していることが認められる。コンクリートの乾燥収縮は逸散水量とほぼ比例することが知られているが[4]、乾燥初期においてスラグ置換率の変化による乾燥収縮ひずみと逸散水量の両者でこの関係は成り立っていない。しかし乾燥収縮の原因は、コンクリートの水のうち主としてゲル水の逸散によるものであることから、乾燥初期におけるスラグ置換率75%の逸散水量は主にキャピラリー水によるものと考えられる。またその後の単位逸散水量当たりの乾燥収縮ひずみはスラグ置換率の変化に関わらずほぼ一定であり且つ乾燥収縮ひずみと逸散水量がほぼ比例関係になっていることが認められた。

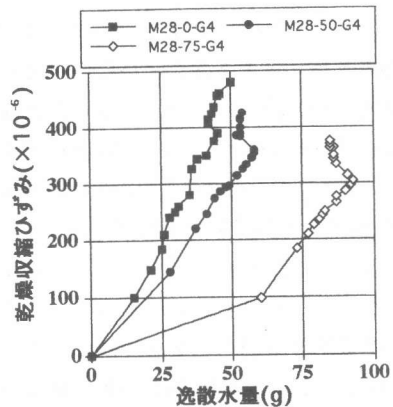


図-12 ひずみと逸散水量(スラグ置換率)

4. (実験Ⅱ) 養生条件の変化による収縮試験と考察

4.1 水中養生後、気乾養生を施した収縮試験

図-13に水中養生日数を0、6、27日と変化した場合の水中養生後の乾燥日数と逸散水量の関係を示す。これより、水中養生期間が長いものほど逸散水量が小さくなる傾向が見られた。図-14は逸散水量と乾燥収縮ひずみの関係を示したものである。D-0、D-7、D-28ともに単位逸散水量当たりの収縮量はほぼ近似しており、逸散水量の大きいものほど乾燥収縮ひずみが大きくあらわれる傾向がみられた。

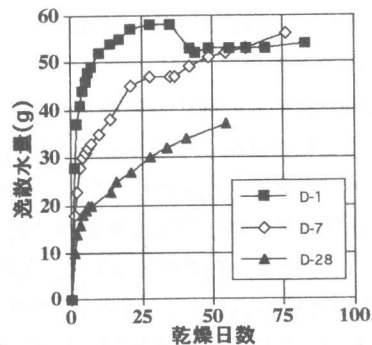


図-13 逸散水量(養生日数)

4.2 水中養生後、封緘養生を施した収縮試験

図-15に水中養生日数を0、6、27日と変化した場合の収縮ひずみの経時変化を示す。水中養生中においても収縮が進行していることがわかる。この水中養生中の収縮は、水中において水の浸透速度が水和収縮によって生じる空隙の生成速度に追いつかず、表層部だけしか水が充填されず内部が自己乾燥状態になっているために生じるとされている[5]。ここで、S-7において封緘に至るまで養生条件がS-28およびWと同一であるのに収縮ひずみに差が生じている。この原因については今後検討していかねばならないと考えられる。しかし収縮速度について封緘養生に切り換えた時点に着目すると、S-7、S-28ともに収縮速度が急激に増加していることがわかる。また、S-7とS-28では封緘後の収縮速度に違いがみられる。これ

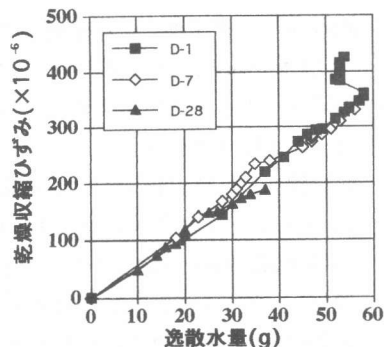


図-14 ひずみと逸散水量(養生日数)

は、S-7、S-28とも配合が同一でスラグ置換率が50%であることから、S-7ではセメントが、S-28ではスラグが主に反応しているためと考えられる。水中養生から封緘養生に切り換えた後の収縮速度は、セメントの種類や混和剤等によって異なると考えられ、今後はセメント組成から検討していく必要がある。さらに水中養生を継続した場合(Wの場合)、水中養生28日以降は収縮速度が減少し収縮ひずみがほとんど生じない傾向がみられる。水中養生中の収縮が先に述べたような自己乾燥状態によるものであるならば、収縮速度が減少し収縮ひずみが生じなくなったコンクリート

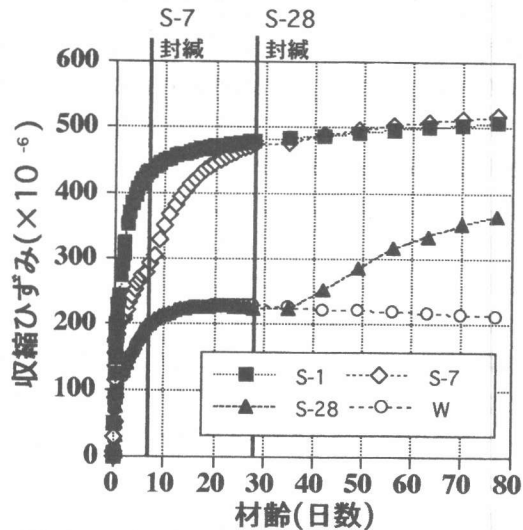


図-15 収縮ひずみの経時変化(養生日数)

内部では、水の浸透速度が水和収縮によって生じる空隙の生成速度に達し、自己乾燥状態が幾分緩和されているのではないかと考えられる。

5. まとめ

本実験における結果は次のようにまとめられる。

- ①水結合材比(W/B)が小さくなると、乾燥収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合が増加する。
- ②粗骨材の破碎値と収縮拘束効果に相関がみられ、破碎値の小さい粗骨材により自己収縮ひずみ及び乾燥収縮ひずみは低減される。
- ③スラグ置換率が大きくなると、乾燥収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの割合が増加する。
- ④水中養生を施した後、気乾養生に切り換えると逸散水量が小さくなり乾燥収縮ひずみが低減された。
- ⑤水中養生から封緘養生に切り換えた後の収縮ひずみ量は、水中養生日数を28日としても増加する傾向がみられた。水中養生を継続すると水中養生日数が28日を超える辺りから、自己乾燥状態が緩和され収縮速度が減少し収縮ひずみ量がほぼ一定となった。

参考文献

- [1] 田澤栄一, 宮澤伸吾, 佐藤剛: コンクリートの自己収縮, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.561-566, 1992.6
- [2] 田澤栄一: 水和反応によるセメントペーストの自己収縮, セメント・コンクリート, No.565, pp.35-44, 1994.3
- [3] 野口貴文, 小野山貫造, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響, 第47回セメント技術大会講演集, pp.720-725, 1993.5
- [4] 西林新蔵, 阪田憲次: コンクリートの乾燥収縮の内部機構に関する一考察, 材料, 第22巻, 第232号, pp.52-56, 1972.9
- [5] 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および配合の影響, 土木学会論文集, No.502, V-25, PP.43-52, 1994.11