

論文 コンクリートの迅速乾燥収縮試験法の研究

小島 正朗*1・三井 健郎*2

要旨: コンクリートの乾燥収縮の迅速試験法について検討した。乾燥を促進する方法として高温・減圧養生を検討した。実験ではまず, 高温・減圧養生によるコンクリート物性の変化を確認し, 次いで使用材料, 調合条件および養生条件が異なる場合について迅速試験を行い, JIS A 1129による収縮率と比較検討した。高温・減圧養生した場合, 収縮率は乾燥後14日以内に収束し, このときの収縮率とJIS A 1129による収縮率に比較的良好な相関が認められた。このことから, 高温・減圧養生が乾燥収縮の迅速評価に有効であることが明らかになった。

キーワード: 乾燥収縮, 迅速試験, 高温・減圧養生, 調合条件, 養生条件

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮が大きいと, 構造物に耐久性上有害なひび割れを生じたり美観を損ねることがあるため, 品質確保の観点からコンクリートの収縮特性を把握しておくことは重要である。しかしながら, JIS A 1129によるコンクリートの収縮率の評価には半年から1年の期間が必要なため容易に実施できない。このため現状は, 収縮特性のチェックをしないままコンクリートを使用している場合が多い。本研究では, 短期間にコンクリートの乾燥収縮特性を評価できる迅速乾燥収縮試験法について検討を行った。

混ぜは50ℓのパン型ミキサを使用した。1バッチ当りの量は35ℓとし, 空練り15秒後, 注水し1分間練り混ぜた。型枠は断面100mmの試験体は鋼製型枠とし, 60および80mmの試験体は木製型枠(ウレタン塗装合板)を用いた。なお, 材料・調合, 練り混ぜ方法は3章, 4章の実験も共通とした。

2.3 試験項目および試験方法

脱型後, 所定の材齢まで湿潤養生し, その後JIS A 1129(コンタクトゲージ法)により乾燥

表-1 実験因子と水準

因子	水準
試験体断面(L=400mm)	60, 80, 100mm
湿潤養生期間	1, 3, 7, 14日
水セメント比	40, 50, 60%

2. 試験体形状が乾燥収縮に及ぼす影響

2.1 実験因子と水準

実験因子と水準を表-1に示す。

2.2 使用材料・調合およびコンクリートの練り混ぜ

使用材料を表-2に示す。調合条件は, 空気量4.5%, 粗骨材かさ容積0.6m³/m³一定とした。コンクリートの調合を表-3に示す。本章ではNo.1, 3, 5の調合を用いた。練り

表-2 使用材料

種別	記号	品質
セメント	N	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
	M	中庸熱ポルトランドセメント(密度3.21g/cm ³)
	H	早強ポルトランドセメント(密度3.14g/cm ³)
細骨材	AS	砕砂(表乾密度2.55g/cm ³ , 吸水率2.63%, FM2.96) 海砂(表乾密度2.55g/cm ³ , 吸水率2.16%, FM2.60)の5:5混合
	K	山砂(表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率1.55%, FM2.90)
	KT	山砂(表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率1.55%, FM2.90) 砕砂(表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率1.85%, F.M2.77)の5:5混合
粗骨材	A	硬砂岩砕石(表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.64%, 実積率57.4%)
	H	"(表乾密度2.67g/cm ³ , 吸水率0.89%, 実積率59.2%)
	T	"(表乾密度2.68g/cm ³ , 吸水率0.83%, F.M6.68)
	D	石灰岩砕石(表乾密度2.70g/cm ³ , 吸水率0.37%, 実積率60.0%)

*1 (株)竹中工務店技術研究所建設技術開発部 工修 (正会員)

*2 (株)竹中工務店技術研究所建設技術開発部主任研究員 工修 (正会員)

収縮を測定した。乾燥条件は温度 20℃，湿度 60%とした。

2.4 試験結果および考察

図-1 に試験体の断面寸法 100mmと断面 60,80mmの収縮率の関係を示す。また、図-2、図-3にそれぞれ湿潤養生期間，水セメント比が異なる場合の断面 100mmと 60の収縮率の関係を示す。いずれの場合も，断面が小さい試験体のほうが乾燥初期の収縮率は大きい，材齢の経過とともに 100mmの収縮率に近づいてくる。試験体断面を 60mm程度まで小さくしても収縮が収束するまでの期間，得られる収縮率はほぼ同等であり，試験体断面を小さくするだけでは収縮を迅速に評価することは困難であることが明らかになった。また，逆

表-3 コンクリートの調合

調合No	材料記号			水セメント比 (%)	設定スパン (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)			
	セメント	細骨材	粗骨材						セメント	細骨材	粗骨材	
1	N	AS ¹	A	40	18	4.5	44.2	185	463	703	912	
2									320	882		
3									185	370		778
4									400	715		
5									308	827		
6	KT ¹	T	50	18	4.5	47.5	179	358	821	933		
7								390	753			
8								175	816		972	
9	K ²	D	50	18	4.5	46.2	175	350	816	972		
10	M	K ²	H	50	18	4.5	48.0	175	350	848	929	
11									350	853		
12									H	350		848

1：高性能AE減水剤使用 2：AE減水剤使用

に乾燥収縮の評価に断面 60mmの試験体を用いても大きな問題がないことが明らかになった。

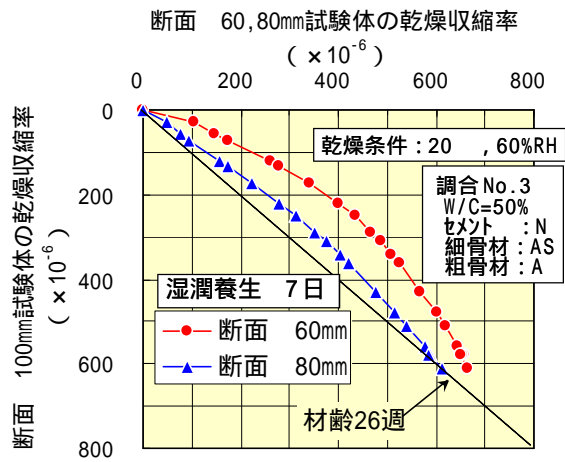


図-1 断面 100mm に対する各断面の乾燥収縮率

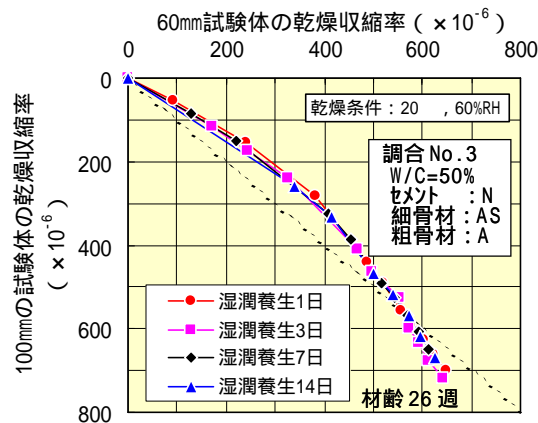


図-2 断面 100mm と 60mm の乾燥収縮率 (湿潤養生期間が異なる場合)

3. 高温・減圧養生が硬化体の性質に及ぼす影響

3.1 実験因子および水準

実験因子と水準を表-4 に示す。

3.2 使用材料・調合・練り混ぜ

コンクリートの調合は表-3のNo.3及びNo11とした。使用材料，練り混ぜ方法は2章と同じとした。

3.3 試験項目および試験方法

所定の材齢まで湿潤養生後，気中養生(温度 20℃，湿度 60%)および高温・減圧養生を行った。高

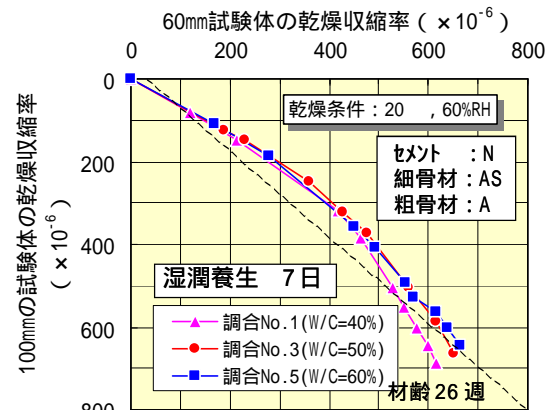


図-3 断面 100mm と 60mm の乾燥収縮率 (水セメント比が異なる場合)

表 - 4 実験因子と水準

因子	水準
セメントの種類	普通、中庸熱
水セメント比	50%
湿潤養生期間	3, 7, 14 日
湿潤養生後の養生条件	気中養生 高温・減圧養生

温・減圧養生には真空乾燥機を使用し、温度 80℃、圧力 0Pa (真空ポンプの到達圧力 0.067Pa) に設定して 14 日間乾燥養生した。所定の養生後、圧縮強度・ヤング係数と細孔構造 (水銀圧入式ポロシチメーター) を測定した。圧縮強度・ヤング係数は 10 × 20cm の供試体を用い、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1149 に準じて試験を行った。細孔構造測定は、コンクリートから 5mm 以下のスクリーニングした試料 (5 × 10cm) を 2.5 ~ 5mm 程度に破碎し、48 時間アセトン浸漬後、24 時間以上脱気乾燥した試料を用いた。

3.4 試験結果および考察

(1) 硬化体の細孔構造の変化

図-4 ~ 図-6 は普通セメントを使用し、それぞれ湿潤養生を 3, 7, 14 日間実施した後、気中養生した場合と高温・減圧養生した場合の細孔分布を比較している。高温・減圧養生を行った場合、細孔分布は 14 日間で急激に大径化した。一方、湿潤養生後に気中養生した場合、材齢 28 日、91 日と徐々に細孔分布は大きい径に移行してゆき、高温・減圧養生を行った場合の細孔分布に近づいていく。図-7 は湿潤養生 7 日とした中庸熱セメントについて、乾燥条件で細孔分布を比較している。中庸熱セメントの場合も普通セメントと同様の傾向が認められた。このことから、高温・減圧養生により乾燥を促進しても細孔構造は気中養生で長期間乾燥を受けるコンクリートと大きな違いはないと考えられる。

(2) コンクリートの圧縮強度・ヤング係数

図-8, 図-9 にそれぞれ普通セメントと中庸熱セメントの場合の各養生後の圧縮強度・ヤング係数の変化を示す。一般に湿潤養生後に気中養生とすると材齢経過に伴う強度の増進が小さく、

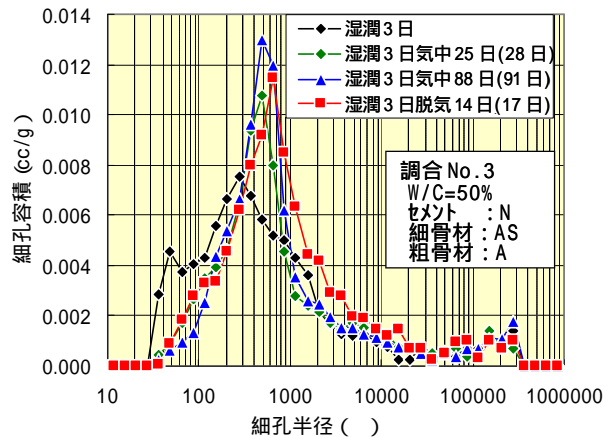


図 - 4 湿潤養生 3 日後の細孔分布の変化 (普通)

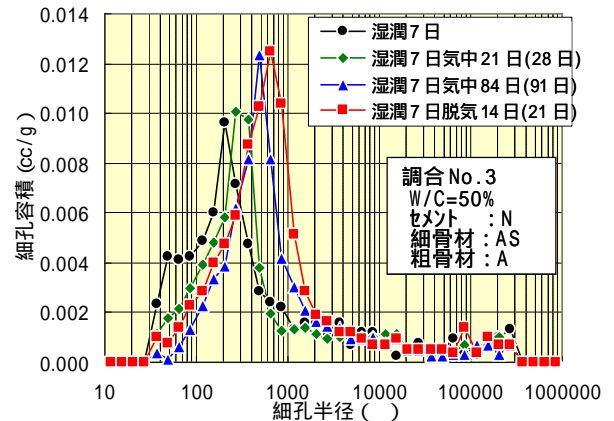


図 - 5 湿潤養生 7 日後の細孔分布の変化 (普通)

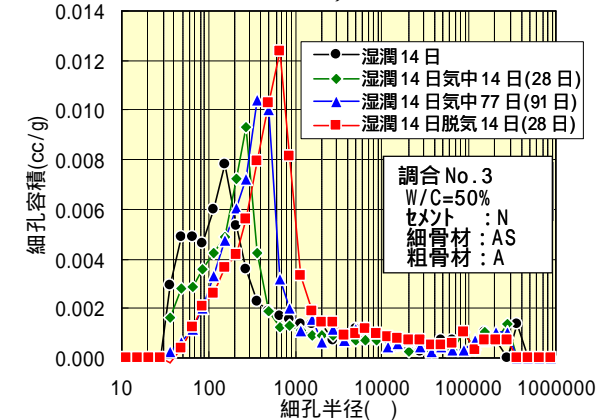


図 - 6 湿潤養生 14 日後の細孔分布の変化 (普通)

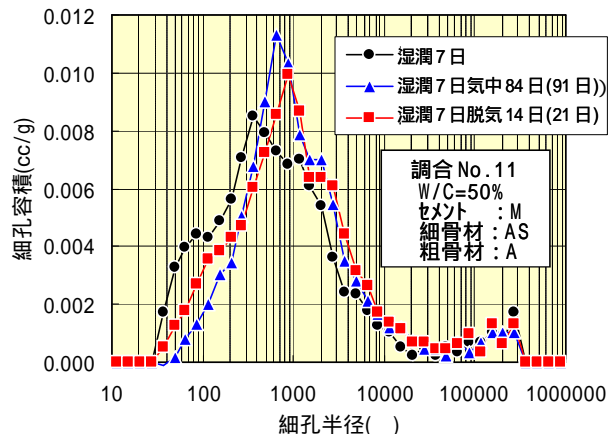


図 - 7 湿潤養生 7 日後の細孔分布の変化 (中庸熱)

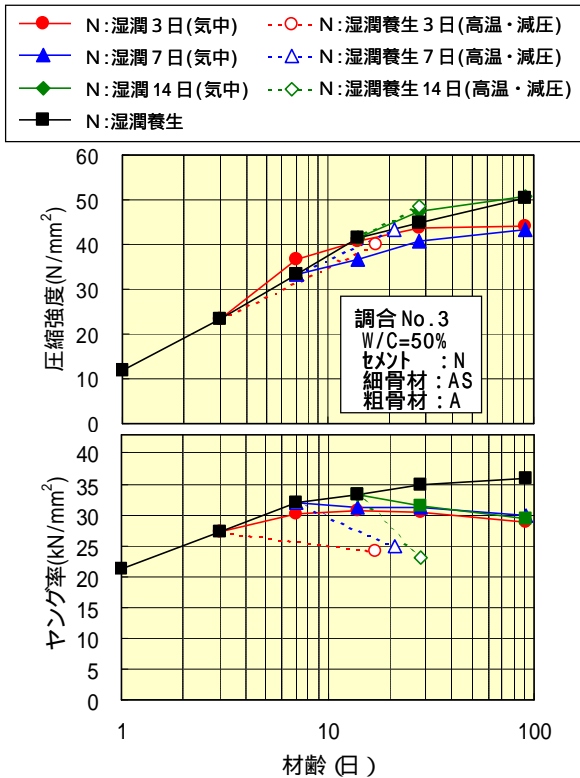


図-8 各種養生による圧縮強度・ヤング係数の変化(普通)

圧縮強度は湿潤養生より低くなる¹⁾ことが知られている。今回の実験でもいずれのセメントも従来の知見と同じ結果となった。高温・減圧養生した場合、中庸熱セメントの湿潤養生3日とした場合を除くと圧縮強度の変化は気中養生した場合と同程度の範囲であった。

ヤング係数は圧縮強度と比べると乾燥による低下が顕著である²⁾といわれており、今回の実験でも気中養生期間が長くなるにつれヤング係数は低下した。高温・減圧養生では、気中養生よりもヤング係数の低下が大きく、普通セメントで20%程度、中庸熱セメントで30%程度低下した。気中養生の材齢91日に対し、高温・減圧養生した試験体のほうが乾燥が進んでいることによると考えられる。コンクリートの収縮の駆動力が毛細管張力であるとすれば、ヤング係数は収縮率の値に影響を及ぼすと考えられ、高温・減圧養生により得られた収縮率の値の評価にはヤング係数の低下の影響を考慮する必要があると考えられる。

4. 高温・減圧養生による乾燥収縮迅速試験

4.1 実験因子と水準

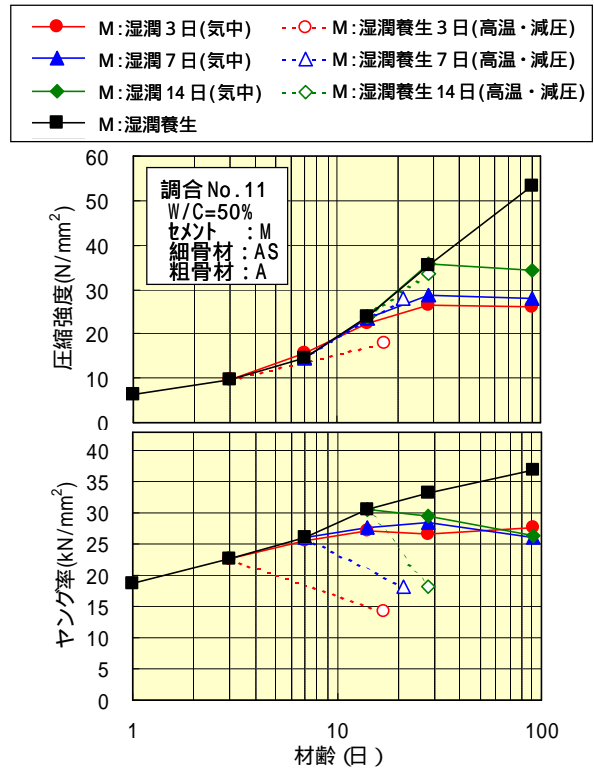


図-9 各種養生による圧縮強度・ヤング係数の変化(中庸熱)

実験因子と水準を表-4に示す。

4.2 使用材料, 調合および練り混ぜ

使用材料, 調合, 練り混ぜは2章と同じとした。調合は表-3のすべての調合を対象とした。

4.3 試験方法

高温・減圧養生による収縮の迅速試験方法の概要を図-10に示す。所定の養生を行った試験体を真空容器に入れ、真空容器ごと温湿度可変チャンパー内に設置し、容器に接続した油回転式真空ポンプ(真空到達度0.067Pa)で減圧する。昇温・減圧は、まず温度20を5時間保持した後80まで1時間で昇温し、5時間程度80を保持後、減圧した。乾燥収縮は試験体の全長を耐熱型の変位計で連続的に測定し、収縮が収束した後(10~15日)、20まで降温し最後に大気

表-4 実験因子と水準

因子		水準
材料・調合	セメントの種類	普通、中庸熱、早強
	水セメント比	40, 50, 60%
	スランプ	8, 18, 24cm
	細骨材の種類	海砂+砕砂, 山砂, 山砂+砕砂
	粗骨材の種類	硬砂岩砕石3種類 石灰岩砕石1種類
養生方法	湿潤養生期間	1, 3, 7, 14日
	蒸気養生	なし、あり(最高温度80)

圧まで開放した。迅速法の試験体は 60 × 400mm (木製：ウレタン塗装合板) とした。比較として実施した JIS 法 (コンタクトゲージ法) は 100 × 400mm (鋼製型枠) とし、乾燥条件は温度 20℃、湿度 60% とした。

4.4 試験結果および考察

(1) JIS 法による収縮

図-11に湿潤養生7日後にJIS法で測定した乾燥収縮試験結果の一例を示す。また、このときの測定材齢間の収縮率増分を測定材齢間隔で除して求めた収縮速度と材齢の関係を図-12に示す。水分の逸散の多い初期材齢ほど収縮速度が大きく、材齢の経過とともに収縮速度は小さくなってゆく。材齢7～10日程度の間収縮速度が一定となる期間があり、材料・調合によってこの期間が不明瞭なものもあったがほぼ同様の傾向であった。

(2) 高温・減圧法による収縮

湿潤養生7日後に高温・減圧養生した場合の収縮の測定結果の一例を図-13、図-14に示す。昇温過程で収縮率が安定しない試験体が数体認められたが、減圧を開始した後は、いずれも安定

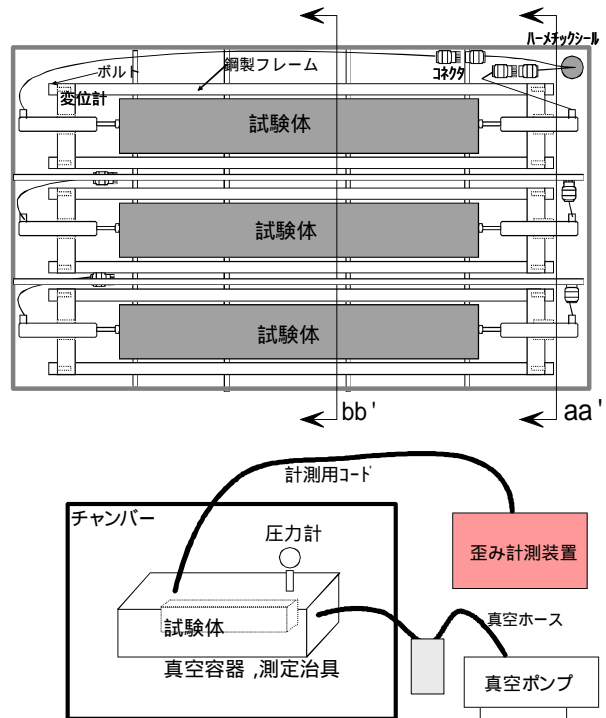


図-10 迅速乾燥収縮試験装置

した値が得られたことから、減圧開始直後の値を基準 (0) として示した。

いずれの材料・調合、養生条件の場合も高温・減圧養生後14日以内に収縮は収束しており、乾

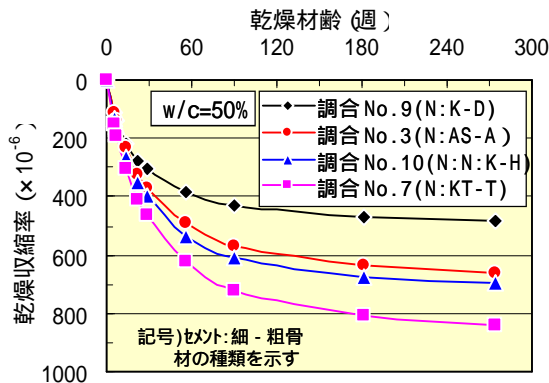


図-11 乾燥収縮試験結果 (JIS 法)

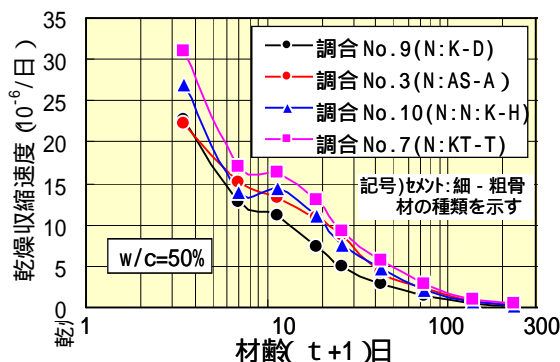


図-12 乾燥収縮速度 (JIS 法)

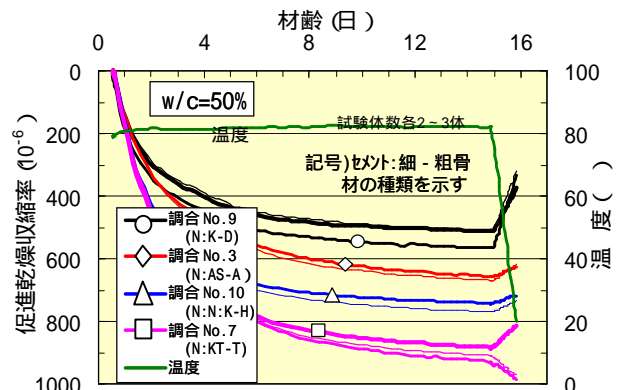


図-13 迅速乾燥収縮試験結果 (骨材が異なる場合)

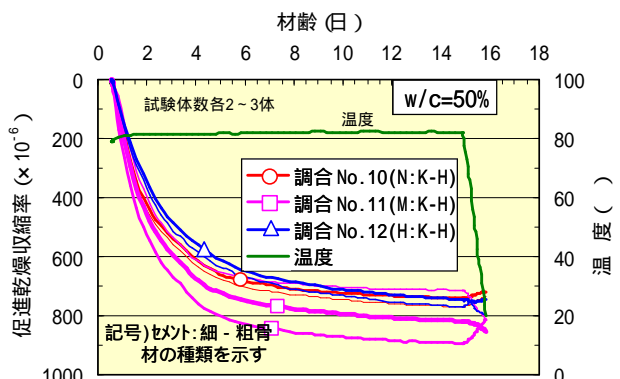


図-14 迅速乾燥収縮測定結果 (セメントが異なる場合)

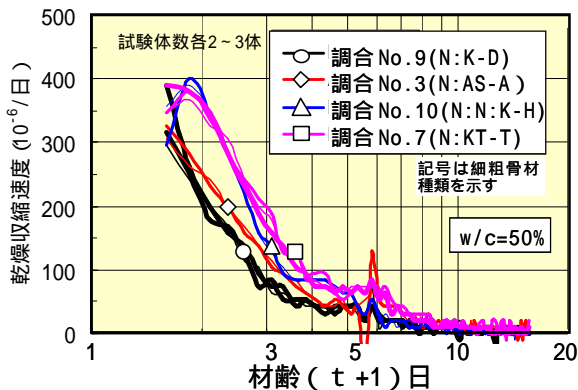


図 - 15 迅速法の乾燥収縮速度 (骨材が異なる場合)

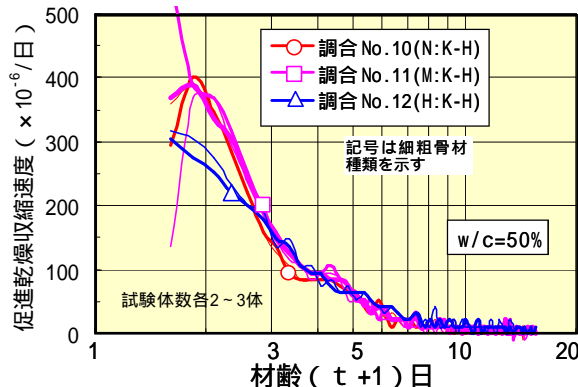


図 - 16 迅速法の乾燥収縮速度 (セメントが異なる場合)

乾燥期間は14日で十分であった。収縮が収束後、20日に降温するまでの間に、コンクリートと鋼製測定時治具の線膨張係数の違いに起因すると考えられる歪が $\pm 30 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度みられた。

図 - 15, 図 - 16 に材齢と収縮速度 (収縮率の増分 / 乾燥時間増分) の関係を示す。収縮速度は材齢とともに小さくなってゆき、JIS法と同様、収縮速度がほぼ一定となる期間が認められた。その後、さらに収縮速度は小さくなり、高温・減圧養生を開始して10日程度で 10×10^{-6} /日程度に収束している。収縮速度の変化は空气中で長期間乾燥を受けた場合と比較的似ており、これは気中養生の場合と高温・減圧養生の場合で細孔構造が似ていたことに起因するものと考えられる。

(3) 迅速法とJIS法の収縮率の関係

JIS法と迅速法の収縮率の関係を図 - 17 に示す。迅速法による収縮率は昇温前の20を基長とし、高温・減圧養生後に降温し20で一定となる時点までから求めた。ただし、昇温過程で大きなばらつきが生じたが、減圧過程で安定した値が得られた試験体については、ずれ分を補正した。また、実

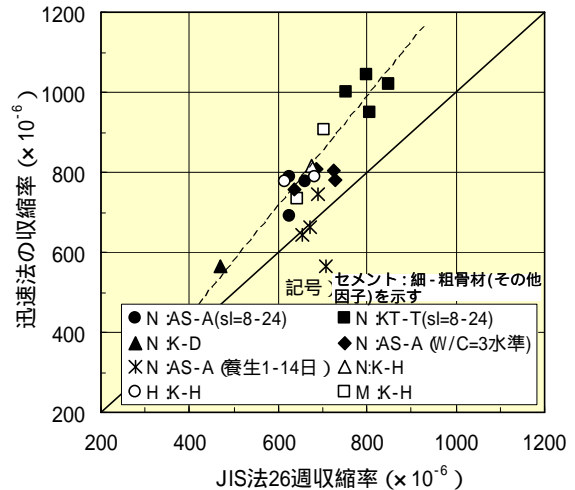


図 - 17 JIS法と迅速法の乾燥収縮の関係

験により高温・減圧養生期間に数日の違いがある場合は、収束した収縮速度を用いて高温・減圧養生の期間が14日となるように補正した。

同図から、養生期間を変化させた場合を除くとJIS法と迅速法で比較的良好な相関が得られており、迅速法による収縮の迅速評価は可能と考えられる。初期養生期間を変化させた場合に傾向が異なったこと、迅速法の収縮率がJIS法より大きくなったことの原因として、乾燥の程度の違いや、乾燥に伴うヤング係数が20~30%低下したことなどが考えられる。迅速法による評価をより適確に行うためには、ヤング係数の変化の影響を補正する方法の検討や、測定誤差を少なくするための測定方法、治具の改良が必要であると考えられる。

5. まとめ

高温・減圧養生によるコンクリートの迅速乾燥収縮試験法について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 高温・減圧養生14日程度でコンクリートの乾燥収縮は収束する。
- (2) 高温・減圧養生による迅速試験法はコンクリートの収縮特性の評価に有効である。

参考文献

- 1) Bureau of Reclamation, Concrete Manual, 11th ed, 1975
- 2) 長谷川寿夫, 洪悦郎, 杉山雅: コンクリートの養生条件, 特に乾燥が圧縮強度・弾性係数に及ぼす影響, セメント技術年報, XXX, pp.320-323, 1976