

[39] コンクリートの乾燥収縮機構に関する研究

正会員 長 滝 重 義 (東京工業大学)

正会員 ○米 倉 亜州夫 (広島大学)

1. ま え が き

コンクリートの乾燥収縮については、今までの多数の研究によって、乾燥収縮に影響を及ぼす種々の要因が検討され、その機構についても、種々の説が示されている。現在は通常環境条件下の中高湿度域においては、セメントゲル中の水分を含んだ空隙に生ずる毛細管張力によって乾燥収縮が生ずるとする毛細管張力理論が有力であり、1968年の RILEM の大会においても、この理論が認められているが、これを具体的に検討した研究報告は非常に少ない。コンクリートの乾燥収縮が毛細管張力によって生ずると考えた場合、毛細管張力は、コンクリートのセメントペースト中の細孔径の大きさとその量によって支配されると思われるので、コンクリートの水セメント比および製造時の養生条件を変えれば、細孔径および細孔容積の異なるコンクリートが得られ、これらのコンクリートの乾燥収縮、逸散水量および細孔径分布を調べることににより、毛細管張力と乾燥収縮との関係を検討することができるとと思われる。そこで、本研究では、以上の問題点を解明するため、コンクリートの水セメント比を19~63%の広範囲にわたって変化させ、製造方法を普通養生、蒸気養生およびオートクレープ養生の3種とし、乾燥収縮ひずみ、重量変化および細孔径分布を測定して、乾燥収縮機構について検討した。さらに、乾燥収縮が毛細管張力による弾性変形とクリープ変形であることを検討するため、クリープ試験も行った。

2. 実験の概要

表-1はコンクリートの配合、水セメント比、単位セメントペースト量について示したものである。本実験で使用した材料は、早強ポルトランドセメント、富士川産砂、西多摩産砕石およびナフタリンスルホン酸塩系の高性能減水剤である。図-1に乾燥収縮およびクリープ試験の供試体を示す。これらの供試体の製造方法は図-2に示す通りであり、普通養生又は蒸気養生(昇温20℃/hr, 65℃3時間保持後、自然冷却)した場合は、材令28日まで標準養生後、又、オートクレープ養生(昇温60℃/hr, 180℃5時間保持後自然冷却)したものは材令3日まで標準養生後試験を開始した。

すなわち、乾燥収縮試験用供試体の場合、基長し、20℃、湿度50%の空气中に静置し、クリープ試験用供試体の場合は、基長し、PC鋼棒にて応力を導入し、20℃、湿度50%の空气中および20℃の水中に静置して、1250日間、それぞれの供試体の長さ変化を傾倒式長さ変化測定器、コンタクト歪ゲージおよびカールソン歪計にて測定し、乾燥収縮

試験用供試体の場合は、重量変化の測定も同時に行った。さらに、1,250日乾燥後、炉乾燥して残留していた水分の測定および炉乾燥前後の長さ変化

表-1 コンクリートの配合
水セメント比(%)
(単位セメントペースト量 m^3/m^3)

単位 水量 (kg/m^3)	単位セメント量 (kg/m^3)		
	300	500	700
130	43.3 (0.236)	26.0 (0.299)	18.6 (0.363)
150	50.0 (0.256)	30.0 (0.319)	21.4 (0.383)
170	56.7 (0.276)	34.0 (0.339)	24.3 (0.403)
190	63.3 (0.296)	38.0 (0.359)	27.1 (0.423)
210	-	42.0 (0.379)	-
230	-	46.0 (0.339)	-

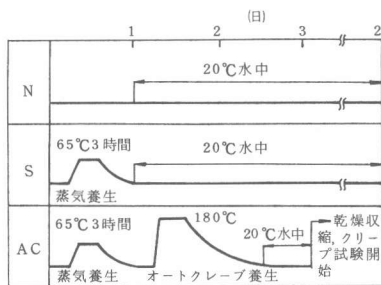
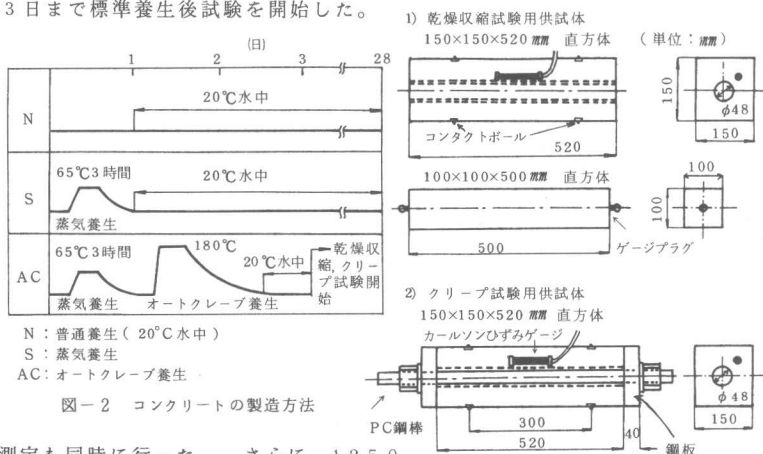


図-2 コンクリートの製造方法

図-1 供試体

の測定を行なった。又、コンクリートよりモルタル部分を取り出し、水銀圧入法ポロシメーターにより、大略の細孔径分布を調べた。クリープ試験の際、供試体の収縮に伴うPC鋼棒の応力の減少については、再緊張を行わず、補正計算を行なって、結果の整理をした。

3. 試験の結果および考察

図-3より単位セメント量(C)が 700 kg/m^3 である高強度コンクリートの場合の乾燥収縮(ϵ_s)は、 $C=300\text{ kg/m}^3$ の普通強度コンクリートの場合より、単位セメントペースト量(P)が大きいにもかかわらず小さいことが示されている。このことは、コンクリートの乾燥収縮が単位セメントペースト量ばかりでなく、セメントペーストの濃度、すなわち水セメント比(W/C)とも密接な関係があることを示している。

ここで、収縮を生じるのは、ほとんどセメントペーストであるので、同一単位セメントペースト量当りの収縮($\epsilon_{s/p}$)、あるいは同一単位セメントペースト量当りの逸散水量(w/p)を新しいパラメーターとして整理すると次のことが論議される。

図-4より、乾燥収縮が水セメント比と密接な関係があることが一層明らかとなっている。この図において $W/C = 2.7\%$ より小さい範囲においては、 $\epsilon_{s/p}$ はほとんど同じ値となる。またこの範囲では強度増加もみられないので、図-5に示すように $\epsilon_{s/p}$ -圧縮強度との関係はそれぞれの養生条件においてほぼ線型の関係を示す。

コンクリートの乾燥収縮が、コンクリートのセメントペースト中の細孔に発生する毛細管張力によって発生すると考えた場合、そのポロシティーの量によっても、乾燥収縮が影響されると思われる。

ポロシティーの量は逸散水量と密接な関係があるので図-6に逸散水量 w/p と圧縮強度との関係を示し、この図と図-5を比較検討する。

図-6より、オートクレープ養生した場合の w/p の値は、他の養生条件の場合より、同一圧縮強度においてやや大きいが、普通養生および蒸気養生の場合、両者の差はほとんど見出せない。

しかし、図-5に示されているように、オートクレープ養生した場合の $\epsilon_{s/p}$ は、他の養生の場合より最も小さく、養生条件によって $\epsilon_{s/p}$ が異なることが示されている。このことは乾燥収縮が逸散水量、従ってポロシティーの量ばかりでなく、細孔径の大きさに関係していることの裏付となるとと思われる。図

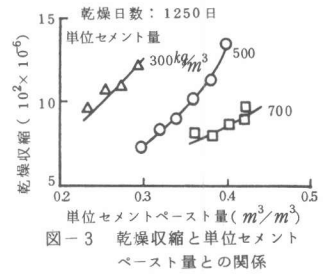


図-3 乾燥収縮と単位セメントペースト量との関係

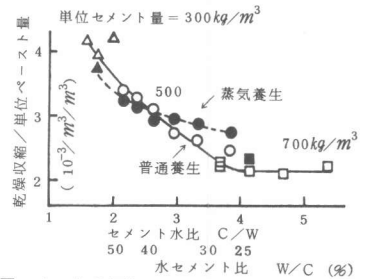


図-4 乾燥収縮(ϵ_s/p)とセメント水比の関係

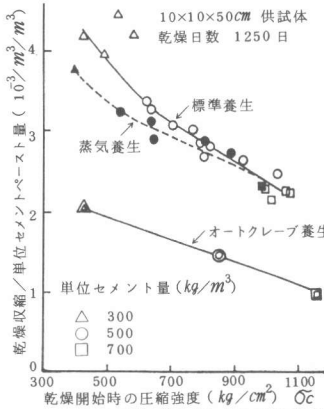


図-5 乾燥収縮(ϵ_s/p)と圧縮強度との関係

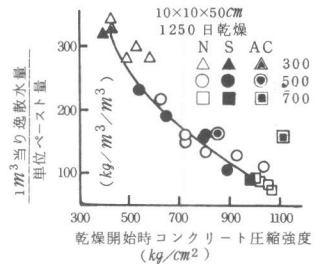


図-6 逸散水量/単位ペースト量と圧縮強度との関係

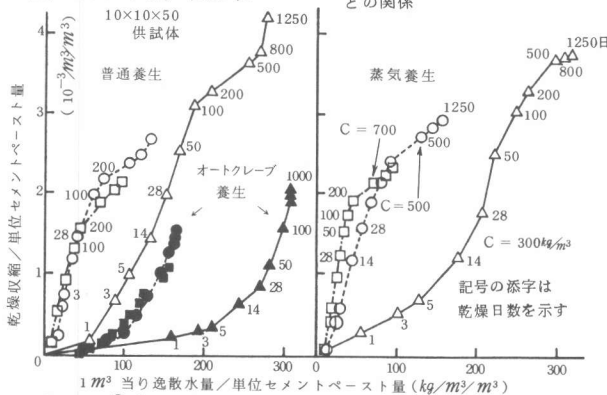


図-8 $\epsilon_s/p - w/p$ 関係

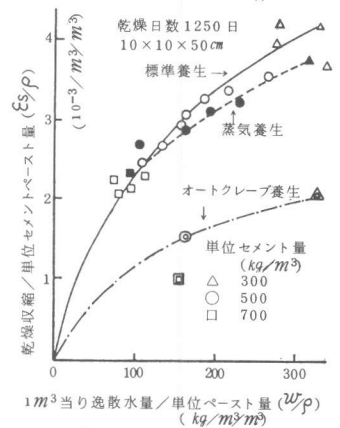


図-7 $\epsilon_s/p - w/p$ の関係

-7, 8には, $\varepsilon_{s/p}$ と w/p との関係が示されており, 図-8より, 乾燥日数に伴う $\varepsilon_{s/p} - w/p$ との関係が養生条件およびコンクリートの強度によって異なることが一層明らかとなっている。

水分が存在する細孔半径の大きさと蒸気圧との関係式は(1)式で示される。

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{2\gamma M}{RTP} \frac{1}{r} \quad \text{..... (1)}$$

ここに, P : 蒸気の圧力, P_0 : 飽和蒸気圧, P/P_0 : 相対湿度, γ : 水の表面張力 (dyn/cm), M : 水の分子量 (18.02 g/mol), R : 気体定数 ($8.315 \times 10^7 \text{ erg/g}^\circ\text{K} \cdot \text{mol}$)
 T : 温度 ($^\circ\text{K}$), ρ : 水の密度 (kg/cm^3), r : 水面の曲率半径 (cm)

この式より, 大きい細孔径の中の水分ほど湿度が大きくても蒸発することが示されている。又, 細孔中に発生する毛細管張力と細孔半径との

関係式は(2)式で示され, それを図-9に示す。式(1)より, 湿度50%のときは半径 16Å 以上の細孔より水分は蒸発することになる。

セメントゲルは図-11の(イ)

又は(ロ)のような薄板状である

といわれており, (ロ)の場合,

ゲル水隙の間隔は大略 $15 \sim 30 \text{ Å}$ であるといわれている。

図-10は, 水銀圧入法によって求めた細孔径分布を示しているが約 $40\text{Å} \sim 30,000\text{Å}$ (3μ)の細孔の範囲しか測定されていない。

この範囲の細孔には全て水分が含まれていたものとして細孔容積の

測定値より 1 m^3 当りの逸散水量を求めたのが表-2に示

してある。又, 1250日乾燥後, 供試体を炉乾燥することによって, 残留水分を求め, これを $15 \sim 30 \text{ Å}$ の細孔にあったものと考え, 逸散可能な全水量より $40 \text{ Å} \sim 3\mu$ および $15 \sim 30 \text{ Å}$ の細孔中の水分を除いた水量を 3μ 以上の細孔に存在していた水分とした。各々の細孔に存在する水分によって発生する毛細管張力を図-9より求め, それぞれの値を用いて, 供試体中のセメントペーストに発生する毛細管張力を表-2のように算定した。

図-11(ロ)に示すように, 毛細管張力は, 水分の蒸発に連れてメニスカスが, より小さい細孔の部分に後退するため, 次第に大きくなり, 実質部分を引き寄せ, その結果として乾燥収縮が生じると考えられる。直径 30 Å 以下の細孔に存在する水分は, 湿度50%においては蒸発しないので, この部分に発生する毛細管張力は最後まで存在し, 30 Å 以上の細孔中の水分は蒸発するので, この部分の毛細管張力は消滅するといえる。しかし, 30 Å 以上の細孔中の毛細管張力によってセメン

トペースト中に発生する応力は表-2に示すごとく $15 \sim 30 \text{ Å}$ の場合より著しく小さい。又, 表-2より, AC養生をした場合の毛細管張力による応力は他の養生の場合よりも著しく小さく, このことがAC養生の場合, $\varepsilon_{s/p}$ が小

さくなることを証明していると思われる。図-12 10×10×50cmコンクリート供試体の脱水量分布 ($C=300 \text{ kg/m}^3$) 乾燥8日目

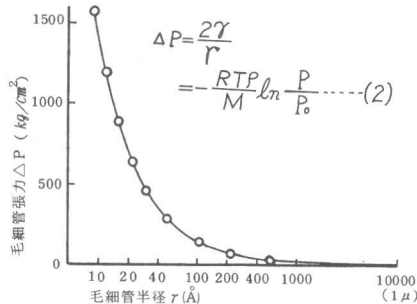


図-9 毛細管半径と毛細管張力との関係

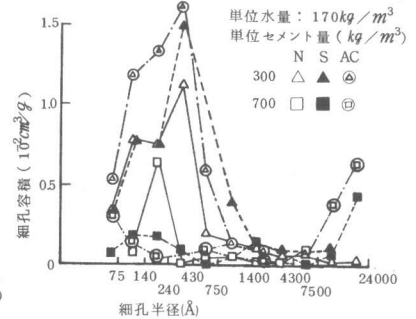


図-10 細孔分布

表-2 毛細管張力および逸散水量

単位セメント量 kg/m^3	養生	毛細管張力 (kg/cm^2), (逸散水量 (kg/m^3))			セメントペースト中の全逸散水量
		3 μ 以上	$40 \text{ Å} \sim 3 \mu$	$15 \sim 30 \text{ Å}$	
300	N	0 (25.9)	6 (24.0)	113 (19.7)	69.6 kg/m^3
	S	0 (30.1)	6 (30.6)	111 (19.3)	80.0
	AC	0 (31.1)	9 (27.3)	60 (10.5)	68.9
500	N	0 (6.4)	1 (15.4)	111 (23.7)	45.5
	S	0 (16.2)	4 (13.4)	92 (19.7)	49.3
	AC	0 (-)	- (-)	66 (14.1)	46.3
700	N	0 (8.4)	1 (9.6)	106 (26.7)	44.7
	S	0 (-)	1 (24.4)	103 (26.3)	43.6
	AC	0 (-)	- (-)	38 (9.3)	51.6

単位水量 = 170 kg/m^3 , 逸散水量は表記の値の外に骨材中の水分がある

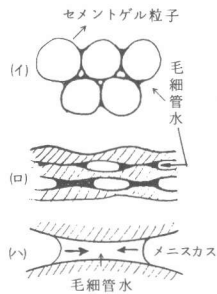
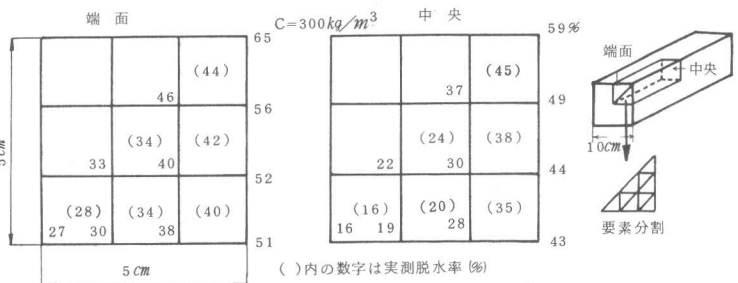


図-11 毛細管水



()内の数字は実測脱水量(%)

乾燥に伴う毛細管張力の発生状況については次のようにして求めた。まず、図-12に示すごとく、供試体端部および中央部の脱水率の分布を供試体の各部分の破片を炉乾燥することによって各々の乾燥材令において測定した。次にコンクリート中の水分の逸散に対して、Piketteをはじめ、多くの研究者が適用している拡散方程式(3)を用いて、コンクリート中の脱水率の分布を計算することを試みた。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots\dots (3) \quad (6 \text{ 面乾燥の場合})$$

(1)
この計算は、藤谷氏が有限要素法を用いる方法によって求めたものを参考にしたが、図-13に示すように、拡散係数(k)および表面係数(f)の値を含水率の変化に応じて、漸次変化させないと、脱水率-時間曲線と一致しなかった。この様なことは、 k , f が物理定数であることから判断して矛盾することであるが、図-12に示されているように、4点の計

算値にとり囲まれた実測の脱水率は、計算値のほぼ平均的な値となっており、この計算方法によって、比較的良好に実際の脱水率の分布を知ることができるといえる。図-14において、B, C間の境界線は40Å以上の細孔に含まれていた水が全て脱水したときの脱水率 w/w_∞ (図-13参照)を示しており、表-2における40Å以上の細孔の含水率が w となる。そして、C, D, E領域の15~30Åの細孔に毛細管張力が発生するとして計算し、その結果を図-15に示した。

この毛細管張力の計算結果を用いて、(4)式によると仮定し計算した乾燥収縮ひずみ(ϵ_s)の計算値と実測値との関係は図-16のようになる。

$$\epsilon_s = \frac{\sum \sigma_t}{E_c} + \sum \sigma_t (\epsilon_t - \epsilon_{t-1}) \dots\dots (4) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_t : \text{ある乾燥時における毛細管張力} \\ E_c : \text{ヤング係数, } \epsilon_t, \epsilon_{t-1} : 15 \times 15 \times 52 \text{ cm} \\ \text{供試体の単位クリープ} \end{array} \right.$$

図-16において、計算値と実測値の一致は乾燥初期に悪く、長期になると一致してくる。(4)式において、ヤング係数は全期間一定であるとしたり、単位クリープの見積りは非常にラフであること、又、毛細管張力は断面に発生する平均毛細管張力を示しているが、実際は、同一断面において表面部と内部では異なる毛細管張力が発生するから、表面部の引張応力、内部の圧縮応力の釣合いの結果として全体の収縮を考えるべきであることなどの問題点があるにもかかわらず図-16に示す計算値は実測値と良く一致しているといえる。このことは、乾燥収縮が毛細管張力による弾性変形とクリープ変形であると考えることの妥当性を示している。さらに図-17より、長期間乾燥後、炉乾燥した場合、炉乾燥前より、高強度コンクリートの場合、膨張しているのは毛細管張力が消滅したためであり、普通強度の場合に収縮しているのは、炉乾燥の際の局所的なマイクロクラックの発生が多かったことによると思われる。この結果は、上記の推論を裏付ける資料となっている。

参考文献：藤谷 義信 「有限要素法による三次元拡散方程式の解析と乾燥問題への応用」第2回電子計算機シンポジウム，日本建築学会 1980.3.

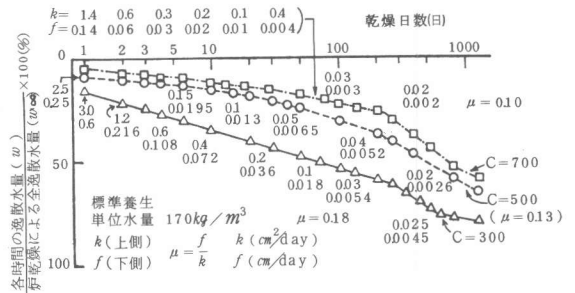


図-13 脱水率と時間および拡散係数(k), 表面係数(f)の変化

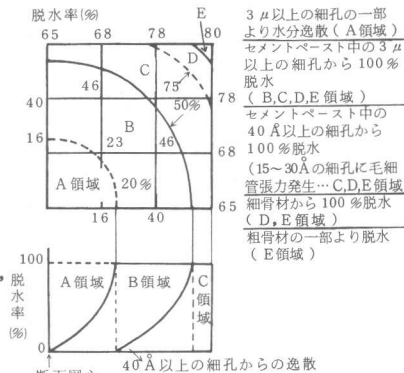


図-14 15~30Åの細孔中の毛細管張力発生領域

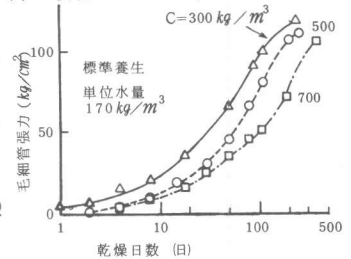


図-15 乾燥に伴う毛細管張力の発生状況

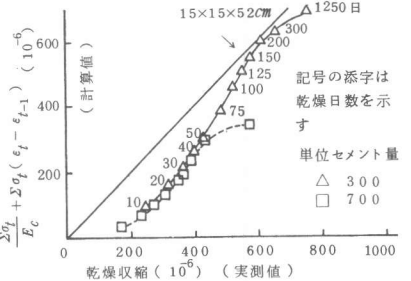


図-16 乾燥収縮の実測値と計算値との関係

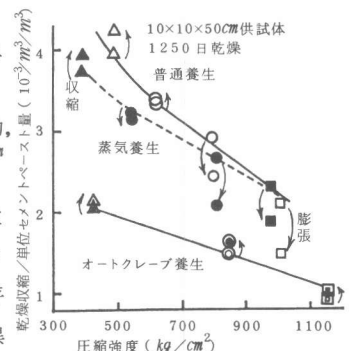


図-17 炉乾燥後の供試体の伸縮