

コンクリートの中性化による質量変化および収縮の挙動に関する実験

DB14070 大山 優

1. はじめに

硬化後のコンクリートは空气中に曝されると乾燥し、質量が減少するとともに収縮する。一方、空気中の二酸化炭素を吸収することで、コンクリートは中性化し質量が増加するが、生成した水の挙動については明確なことがわかっていない¹⁾。また、このときかなり大きな収縮（炭酸化収縮）が生じるとされている²⁾。このように、コンクリートを気中に曝した場合の挙動は複雑であるが、系統的に研究した例は見当たらない。本実験では、通常の水セメント比のコンクリート供試体を作製して促進中性化試験を行い、中性化による質量変化と収縮の挙動について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験の要因と水準を表 1 に示す。水セメント比は 3 水準を設定した。JASS5 では水セメント比の上限を 65% としているが、試験の結果を早期に得るため、水セメント比 70% のものについても試験を行った。供試体の保存条件は、4 週間の標準養生後に 20℃60%R.H. で 4 週間乾燥を行い、その後乾燥を継続するものと、JIS A 1153 に準じて促進中性化を行うものの 2 つを設定した。

2.2 使用材料および調合

使用材料を表 2 に、計画調合表を表 3 に示す。基本的な条件は鈴木氏の実験³⁾の材料、調合を踏襲している。単位水量は一定とし、このため、単位セメント量は水セメント比が大きいものほど小さくなっている。

2.3 コンクリート供試体の作製

材料準備および練混ぜは、JIS A 1138 に準じて行った。使用材料、型枠、ミキサおよび練り舟は前日から 20℃の練混ぜ室に保管しておいたものを使用した。供試体の形状と寸法を表 4 に示す。通常、長さ変化の試験に用いる角柱供試体は 100×100×400(mm) であるが、試験の結果を早期に得るため、通常の半分の幅である 100×50×400(mm) の供試体で試験を行った。コンクリートのフレッシュ性状および力学的性状は表 5 に示すとおりである。促進中性化および乾燥を継続する供試体は、材齢 8 週時に、角柱供試体は打込み面、底面および両端面を、円柱供試体は打込み面および底面をエポキシ樹脂でコーティングし、翌日、中性化槽および恒温恒湿槽へそれぞれ移動した。

表 1 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比	50%, 60%, 70%
保存条件	4週標準養生+4週乾燥後、乾燥継続, 促進中性化

表 2 使用材料

使用材料	品質		
セメント	普通ポルトランドセメント JIS R 5210	密度	3.16g/cm ³
		比表面積	3280cm ² /g
細骨材	大井川水系陸砂	表乾密度	2.58g/cm ³
粗骨材	青梅産硬質砂岩 砕石 2005	表乾密度	2.65g/cm ³
		実積率	60.9%
水	水道水		
混和剤	AE減水剤およびAE助剤		

表 3 計画調合表

水セメント比 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	質量 (kg/m ³)			AE減水剤 (C×%)	AE助剤 (C×%)
						セメント	細骨材	粗骨材		
70	18	4.5	49.1	172	0.59	246	893	952	0.25	0.0045
60	18	4.5	48.1	172	0.59	287	859	952	0.25	0.0045
50	18	4.5	46.7	172	0.59	344	812	952	0.25	0.0045

表 4 供試体の形状と寸法

用途	形状	寸法(mm)	本数
4週圧縮強度	円柱	100φ×200	3
乾燥継続および促進中性化	角柱	100×50×400	3
	円柱	100φ×200	2

表 5 コンクリートのフレッシュ性状と力学的性状

水セメント比 (%)	フレッシュ性状				力学的性状				
	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/L)	練り上がり温度 (°C)	動弾性係数 (kN/mm ²)	超音波伝播速度 (km/s)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	含水率 (%)
70	16.5	3.9	2.28	20.5	32.9	4.46	22.8	25.9	7.82
60	16.5	3.7	2.29	20.0	35.5	4.58	33.2	27.7	7.50
50	17.0	3.3	2.31	20.0	37.5	4.66	40.8	29.9	7.29

3. 試験方法

3.1 長さ変化

角柱供試体について、1 週間ごとに長さ（ひずみ）の測定を行った。長さ変化の測定は、別途実施した実験⁴⁾により、JIS A 1129-1（コンパレータ方法）による測定値と、JIS には規定されていない埋込みゲージによる測定値が、ほとんど同じになったことから、埋込みゲージによる測定を行った。埋込みゲージの測定に用いたデータ

ロガーは、つねに1つのチャンネルに1つの供試体を対応させた。なお、各シリーズ1本のみコンパレータ方法による測定も行った。

3.2 質量変化

すべての供試体について、ひょう量 22 kg、目量 0.1g の電子はかりで、脱型時より1週間ごとに質量の測定を行った。なお、角柱供試体については、埋込みゲージとコードを含む質量を測定した。

3.3 中性化深さの測定

中性化深さの測定は、鈴木氏の実験³⁾を参考に、中性化深さが10mmおよび20mmになると予想される促進期間で、コンパレータ方法を適用している角柱供試体1本を除く2本について、埋込みゲージを破損しない端面より5cmの位置で割裂し、JIS A 1152に準じて片側5点、合計10点について測定を行った。円柱供試体については、同じ促進期間で1本を割裂し同様に測定を行った。

4. 試験結果

4.1 長さ変化

促進中性化開始以降の長さの経時変化を図1に示す。促進27週頃から39週頃まで、恒温恒湿槽はたびたび故障し、試験槽内の温度と湿度が上昇したため、測定値が大きく変動している。供試体の保存条件で見ると、促進中性化を行った供試体の長さ変化率は、乾燥を続けたものよりも、1.5倍から3.0倍程度の大きな収縮ひずみが生じた。また、乾燥を続けた供試体は、水セメント比によらず同程度の収縮が生じ、これらは促進26週以降ほとんど一定となっている。一方、促進中性化を行った供試体では、早期の長さ変化率は水セメント比の大きいものほど大きくなっているが、促進26週以降、水セメント比60%の供試体の長さ変化率は、水セメント比70%のものよりも大きくなっている。

図2は、図1を水セメント比別に示したものである。点線は促進中性化を行った供試体の長さ変化率から乾燥を続けた供試体の長さ変化率を減じたもの(ε_{CO_2} とする)である。ここで ε_{CO_2} は、乾燥の影響を受けない、中性化のみによる長さ変化と考えることができる。

水セメント比70%では、 ε_{CO_2} は促進15週以降、減少から増加へ傾向が変化しているが、促進中性化を行った供試体の長さ変化率は、促進15週以降も減少傾向にあり、これが一定となるのは、促進25週以降となっている。

水セメント比60%では、促進中性化を行った供試体の長さ変化率が一定となるのは、促進36週以降であるが、 ε_{CO_2} の傾向が変化する促進期間は、恒温恒湿槽の故障があった期間に該当すると考えられ、不明瞭となっている。

水セメント比50%では、促進中性化を行った供試体の長さ変化率は減少を続けており、これに伴って、 ε_{CO_2} も緩やかに減少を続けている。

4.2 質量変化

促進中性化開始以降の質量の経時変化を図3に示す。前述のとおり恒温恒湿槽では故障があったが、質量変化には長さ変化ほど大きな変動は見られなかった。供試体の保存条件で見ると、乾燥を続けた供試体は質量が減少しているのに対し、促進中性化を行った供試体は質量が大きく増加している。また、乾燥を続けた供試体は、水セメント比によらず同程度の質量変化であり、促進48週以降ほとんど一定となっている。一方で促進中性化を行った供試体では、早期の質量変化率は水セメント比の大きいものほど大きくなっているが、促進29週以降、水セメント比60%の供試体の質量変化率は、水セメント比70%のものよりも大きくなっている。

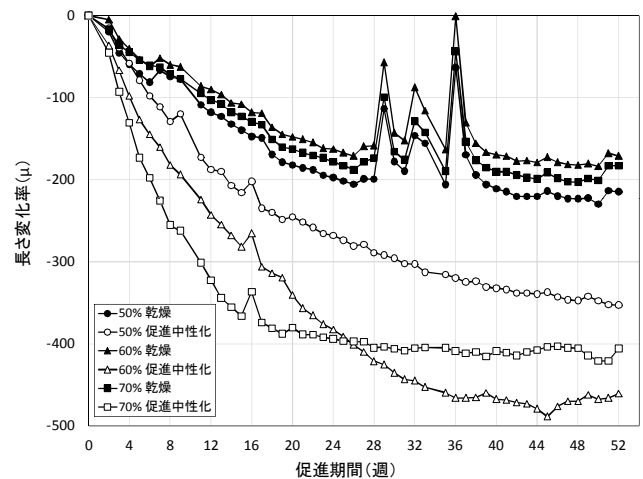


図1 長さの経時変化 (全体)

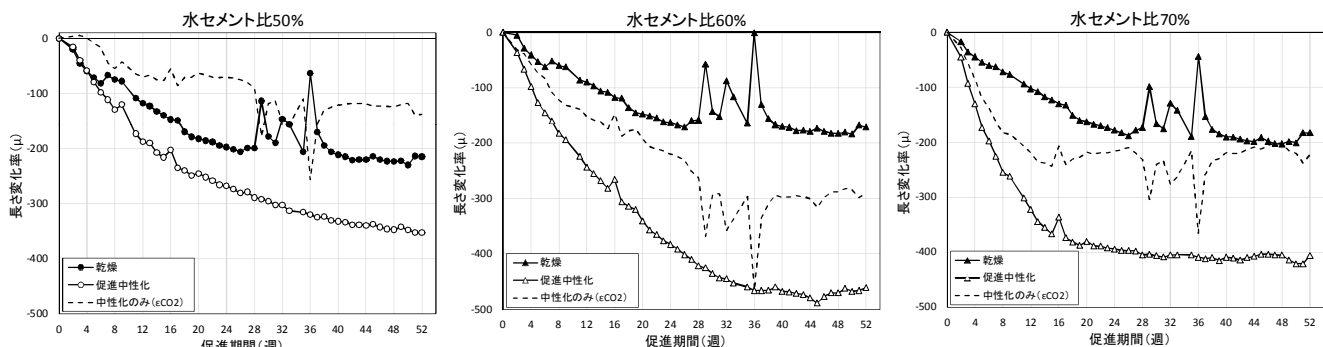


図2 長さの経時変化 (水セメント比別)

図4は、図3を水セメント比別に示したものである。点線は促進中性化を行った供試体の質量変化率から乾燥を続けた供試体の質量変化率を減じたもの(m_{CO_2} とする)である。 ε_{CO_2} と同様に、 m_{CO_2} は、乾燥の影響を受けない、中性化のみによる質量変化と考えることができる。

水セメント比70%では、促進中性化を行った供試体は、促進16週まで増加を続け、以降は減少へと転じているが、乾燥を続けた供試体の質量が、より大きい変化率で減少を続けているため、 m_{CO_2} はわずかに増加傾向にある。

水セメント比60%では、促進中性化を行った供試体は、促進36週以降一定となっているが、水セメント比70%の供試体と同様に、 m_{CO_2} は増加を続けている。

水セメント比50%では、促進中性化を行った供試体の質量変化率および m_{CO_2} は、それぞれ、ほとんど一定の傾きで増加を続けている。

4.3 中性化深さ

中性化深さの測定結果を表6に示す。いずれの測定においても角柱供試体よりも円柱供試体のほうが、中性化が進行していた。これは、円柱供試体は、その形状から角柱供試体に比べて乾燥しやすく、また、二酸化炭素が中心に向かって進行するためと考えられる⁵⁾。中性化深さの経時変化を図5に示す。促進期間を平方根で示し、また、水セメント比ごとの測定値の原点回帰直線が、それぞれの測定値と大きくかけ離れていなかったため、この直線の傾きを中性化速度係数として、その式を図中に記した。水セメント比の大きいものほど直線の傾きは大きく、中性化速度係数も大きい値となっている。なお、

水セメント比70%の中性化速度係数は60%のものの1.7倍、水セメント比60%の中性化速度係数は50%のものの1.8倍程度となっている。

5. 試験結果の検討

5.1 恒温恒湿槽の故障について

促進27週頃から39週頃まで、恒温恒湿槽内部の温度と湿度が上昇したことは先述したが、この期間の質量変化はあまり大きくなかったことから、恒温恒湿槽に保存されていた供試体は、空気中の水分を大量に吸収したわけではないと推定される。また、長さ変化については、吸水による膨張ではなく、試験槽内部の温度上昇による熱膨張と考えられる。このため、今回の試験槽の故障は、実験全体に及ぼす影響は小さいと考えられる。

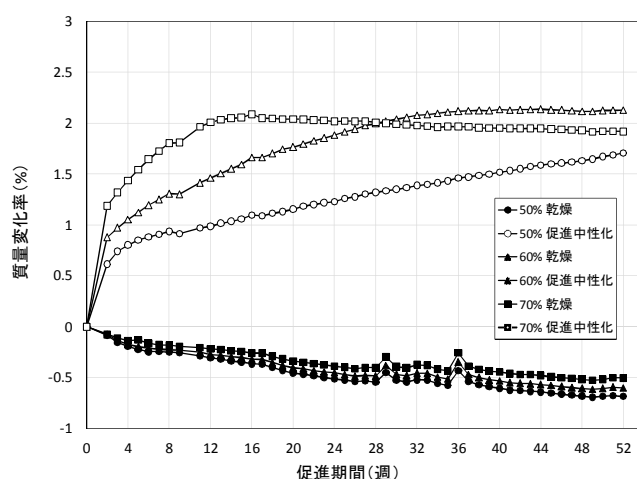


図3 質量の経時変化（全体）

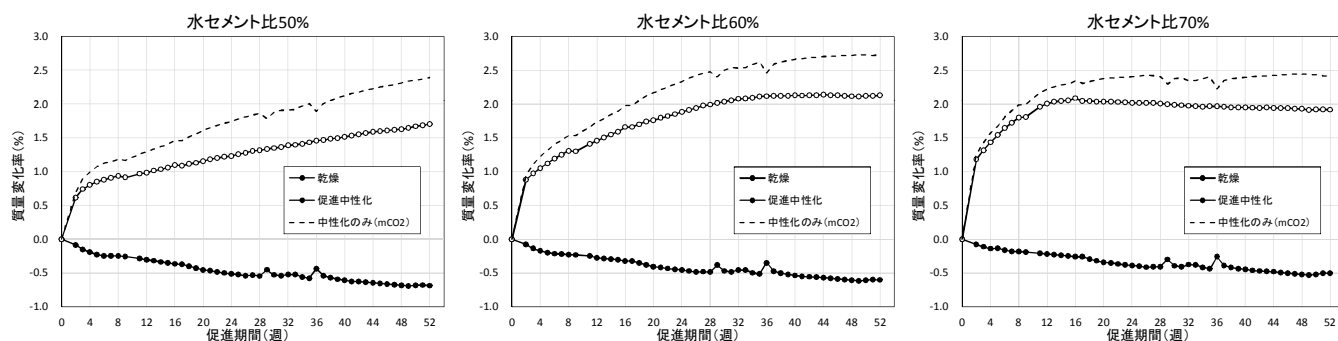


図4 質量の経時変化（水セメント比別）

表6 中性化深さ測定結果

水セメント比	促進期間	中性化深さ(mm)		円柱/角柱
		角柱供試体 (2本平均)	円柱供試体 (1本)	
70%	2週	11.9	13.6	1.14
	5週	16.8	18.4	1.10
60%	5週	11.6	12.2	1.05
	19週	19.1	20.2	1.05
50%	13週	9.9	10.0	1.01
	52週	17.8	18.9	1.06

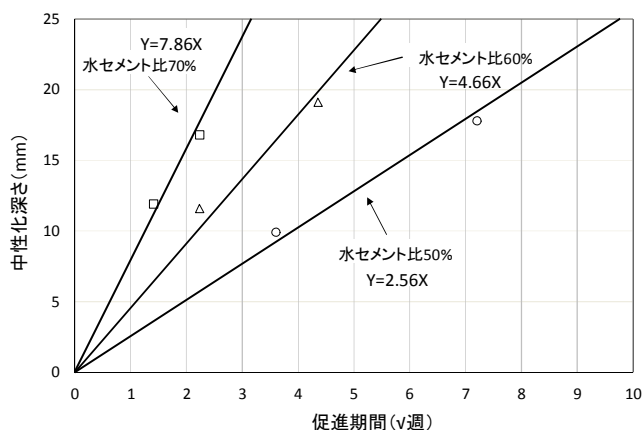


図5 中性化深さの経時変化

5.2 炭酸化収縮について

促進中性化を行った供試体では、質量が増加していることに加え、乾燥を継続した供試体よりも大きな収縮ひずみが生じている。このことから、この供試体は中性化し、これに伴って炭酸化収縮が生じていると考えられる。

5.3 中性化深さと質量変化の関係

中性化による質量増加は、下記①式より、吸収した二酸化炭素の質量によるものと考えられる。すなわち、質量増加は二酸化炭素の吸収量と考えることができる。ここで、中性化深さと m_{CO_2} の関係を図6に示す。いずれの水セメント比でも直線的となっており、また、中性化深さが同一と推定されときの質量変化率は、水セメント比の大きいものほど小さくなっている。これは、水セメント比の大きい供試体は単位セメント量が少なく、二酸化炭素の吸収量が中性化深さに及ぼす影響が大きいためと考えられる。中性化深さと単位セメント量あたりの m_{CO_2} の関係を図7に示す。いずれも直線的であり、かつ、水セメント比によらず、ほとんど同じ直線形となった。これらのことから、供試体の質量変化と単位セメント量から、コンクリートの中性化深さを水セメント比によらず推定できる可能性がある。

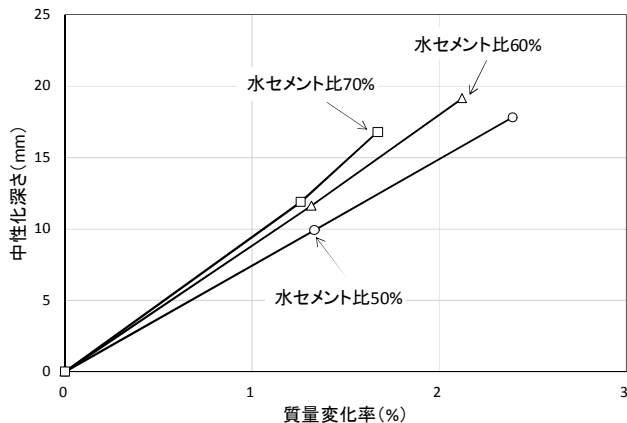
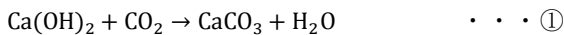


図6 中性化深さと質量変化の関係

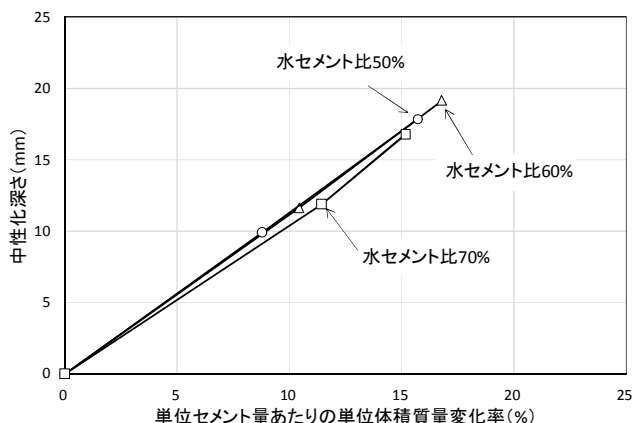


図7 中性化深さと質量変化の関係(単位セメント量あたり)

5.4 中性化の終了について

長さ変化および質量変化から、水セメント比ごとに、供試体全体が中性化した時期の推定を行う。水セメント比70%の供試体では、 ϵ_{CO_2} は促進15週を境に減少から増加へ傾向が変化している。また、促進中性化を行った供試体の質量は促進16週以降減少へ転じている。このことから、水セメント比70%の供試体は促進16週前後に全体が中性化したものと考えられる。水セメント比60%では、 ϵ_{CO_2} の傾向が変化した時期は明瞭でないが、促進中性化を行った供試体の質量は、促進36週以降一定となっている。前述の通り、質量の増加は二酸化炭素の吸収量であるので、促進36週以降、二酸化炭素を吸わなくなった、すなわち、供試体全体が中性化したものと考えられる。水セメント比50%の供試体については、促進52週における中性化深さが17.8mmであり、25mmに到達していないため、これ以降も供試体の収縮と質量増加が続くものと考えられる。

5.5 水の挙動について

中性化終了後の供試体の質量変化から、中性化によって生じた水の挙動を検討する。いずれの水セメント比においても、乾燥を続けた供試体は質量が減少を続け、48週以降一定となっている。水セメント比60%および70%の供試体の中性化終了後の質量は、ほとんど一定か、わずかに減少傾向にある。その減少量は、乾燥を続けた供試体よりも小さいため、 m_{CO_2} は増加傾向を示している。これらのことから、中性化終了後、コンクリート中の水分は、わずかに逸散するものもあるが、そのほとんどは内部に留まっていると考えられる。

【参考文献】

- 1) 阿部道彦、齊藤辰弥：コンクリートの中性化と質量変化の関係に関する検討，第44回セメント・コンクリート研究討論会論文集，pp.13-18, 2017.10
- 2) 上村克郎：乾燥と中性化によるモルタルの収縮と重量変化，セメント・コンクリート，No.207, pp.2-6, 1964 および No.208, pp.12-20, 1964
- 3) 鈴木賀久、阿部道彦：コンクリートの中性化に及ぼす温度条件の影響（20℃と40℃の比較），日本建築学会関東支部研究報告集，pp.125-128, 2017.2
- 4) 真野孝次、他5名：非鉄スラグ骨材を使用したコンクリートの圧縮強度・乾燥収縮，日本建築学会関東支部研究報告集I，pp.45-48, 2017.2
- 5) 中村則清、他4名：コンクリートの促進中性化に及ぼす試験方法上の要因の影響（その2：供試体の条件の影響），AIJ大会学術講演梗概集，pp.533-534, 2003.9