

報告 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

中村 則清^{*1}・鈴木 澄江^{*2}・阿部 道彦^{*3}・鹿毛 忠継^{*4}

要旨：コンクリートの促進中性化試験における各種要因が試験結果に及ぼす影響を把握するために実験を行った。検討要因は、試験装置の種類、供試体の形状・寸法、供試体のシールの影響、型枠はく離剤の影響、バッチ間の影響である。これらの実験結果から、促進中性化試験結果に及ぼす影響要因とその程度について報告するものである。

キーワード：促進中性化、炭酸ガス濃度、中性化深さ、中性化速度係数、供試体寸法

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を評価する方法の一つに、コンクリートの促進中性化試験がある。これまで、コンクリートの促進中性化試験に関して多種多様な実験的研究が行われてきたが、各研究により実験条件が異なり、それらの結果について統計的整理や、定量的比較を行うことが困難であった。それら既往の研究の特徴は、セメント等の使用材料の影響についての研究が多く、試験装置および供試体の条件についての影響要因に関する研究事例^{1),2)}は十分にあるとは言い難い。

現在、提案されているコンクリートの促進中性化試験方法(案)は、(社)日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」の「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」(1991)である。これに基づき(社)日本コンクリート工学協会内に設置されたコンクリート試験方法 JIS 改正原案作成委員会(委員長：榊田佳寛 宇都宮大学教授)において2002年3月にJIS原案が作成され、2003年にJIS化する方向で検討が行われている。JIS(案)では、供試体の形状・寸法、促進中性化させる面等が規定されているが、これらの要因・水準が異なった場合の促進中性化に関するデータは十分には整っ

ているとはいえない。

2. 目的

本報告では、促進中性化試験装置の仕様の差、供試体の形状・寸法、供試体のシールの有無、型枠離型剤の有無、バッチ間の差について実験を行い、コンクリートの促進中性化試験結果に及ぼす影響要因とその程度について検討を行い、促進中性化試験方法の標準化に資することを目的とする。

3. 実験概要

3.1 要因と水準

今回の実験の要因と水準を表-1に示す。

3.2 使用材料、調合および練混ぜ

今回の実験に使用した材料を表-2に、コンクリートの調合および各種物性値を表-3に示す。目標スランプおよび目標空気量は、それぞれ18cm, 4.5%である。コンクリートの練混ぜは100L強制練りミキサを使用した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準(数)
試験所間比較	5試験機関[A~E]の装置(5)
形状・寸法の影響	円柱および角柱各2種類(4)
シールの影響	2面開放および4面開放(4)
はく離剤の影響	はく離剤ありおよび無し(2)
バッチ間の影響	2バッチ(2)

*1 (財)建材試験センター 浦和試験室 修士(工学) (正会員)

*2 (財)建材試験センター 中央試験所 (正会員)

*3 工学院大学 建築都市デザイン学科 工博 (正会員)

*4 国土交通省国土技術政策総合研究所 Ph.D. (正会員)

3.3 試験方法

促進中性化試験は、(社)日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」の付録「付1 コンクリートの促進中性化試験方法(案)」に従って行った。

供試体の作製は、 20 ± 2 の環境で行い、供試体は型枠を取り外した後、温度 20 ± 2 の水中で材齢 4 週まで養生を行った。水中養生後、温度 20 ± 2 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温室に 4 週間静置した。供試体にシールを施すものに関しては、気中養生期間の最後 1 週間にエポキシ樹脂系接着剤を用い厚さ 1mm 程度にピンホールがないようにシールを行った。シール面は、2 面開放のものについては、供試体の両側面以

外の面についてシールを施した。4 面開放についてはは全面シール無しとした。

試験所間比較用供試体の設置については、各試験所の装置内部を柵で 3 段に分け、槽内の上段中央、中段左、中段中央、中段右、下段中央の位置に設置した。また、その他の要因に関する供試体については、試験所 E において、試験所間比較用供試体を設置後の余剰スペースに設置し試験に供した。なお、全ての供試体は、シール面が風向に鉛直になるように設置した。

促進中性化条件は温度 20 、相対湿度 60% 、炭酸ガス濃度 5% とし、促進期間は 9 週、16 週および 25 週とした。

表 - 2 使用材料

セメント	普通ポルトランド(3社混合) 平均4週圧縮強さ: $64.0(N/mm^2)$, 密度: $3.15(g/cm^3)$
細骨材	大井川水系産陸砂 表乾密度: $2.60(g/cm^3)$, 吸水率: $1.96(\%)$, FM: 2.76
粗骨材	青梅市成木産硬質砂岩碎石 表乾密度: $2.65(g/cm^3)$, 吸水率: $0.51(\%)$, 粒形判定実積率: $63.3(\%)$, 最大寸法: $20(mm)$
化学混和剤	AE 減水剤標準形(リグニンスルホン酸系), AE 助剤
水	イオン交換水

表 - 3 コンクリートの調合および各種物性値

記号	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	単体量(kg/m ³)			スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度()	圧縮強度 (N/mm ²)	
				C	S	G					28日	91日
55	55	47	182	331	816	938	19.9	35.0×34.0	4.1	21.8	42.9	47.9
55							20.5	37.0×33.5	4.2	21.8	40.4	45.3
65	65	48	182	280	853	943	20.5	35.0×31.0	4.3	22.0	29.4	34.9
65							20.2	36.0×35.0	4.3	22.2	29.3	34.9

表 - 4 促進中性化試験装置の仕様

試験所	装置の寸法 (mm)			温度 ()		湿度 (% R.H.)		CO ₂ 濃度 (%)	
	幅	奥行	高さ	制御範囲	槽内分布*	制御範囲	槽内分布*	制御範囲	槽内分布*
A	830	710	1500	20~60	±1	30~90	±5	0~20	不明
B	3500	2800	2600	10~60	±1	45~85	±3	0~20	±0.2
C	4070	1970	2100	-10~80	±0.3	20~95	±5	0~20	不明
D	830	710	1530	-5~70	±1	40~98	±5	0~20	±0.1
E	830	710	1530	0~60	±1	40~98	±5	0~20	±0.2

* : 制御によるバラツキ

3.4 試験装置の仕様

比較試験に使用した試験装置の仕様を表 - 4 に示す。試験装置はチャンバータイプ (A, D および E) およびビルドインチャンバータイプ (B および C) の 2 種類である。

4. 試験結果

4.1 試験所間の比較

各試験所における促進中性化試験結果を表 - 5 および図 - 1 に示す。

試験装置内の温度，相対湿度および炭酸ガス濃度の分布 (5 点) は水銀温湿度計および熱線型熱伝導式ガス検知器を用いて行った。その結果，5 試験所とも JIS (案) の範囲内 (温度 20 ± 2 ，相対湿度 $60 \pm 5\%$ ，炭酸ガス濃度 $5.0 \pm 0.2\%$) であった。

5 試験所における 9 週と 16 週の中性化速度係数の分布は，平均値が $3.8 \text{ mm}/\sqrt{\text{週}}$ ，標準偏差が $0.41 \text{ mm}/\sqrt{\text{週}}$ ，そして変動係数が 10.9% であった。B 試験所では，9 週から 16 週で中性化速度係数が小さくなっているが，これは一時装置の故障により炭酸ガス濃度が低くなったことに起因するものと推測される。また，D 試験所では相対湿度が 64 ~ 65% と他より高かったことが中性化速度係数が全般に小さくなった一因と考えられる。供試体の設置位置の影響については明瞭な傾向が認められなかった。これは装置内の環境が比較的均質だったことによると考えられる。

なお，装置内の環境条件を記録紙で確認していたのは B 及び E 試験所のみであった。

4.2 各種要因の比較

各種要因における実験結果を表 - 6 に示す。

(1) 供試体の形状・寸法の影響

供試体の形状・寸法と中性化速度係数の関係を図 - 2 に示す。形状を比較すると，円柱供試体の方が角柱供試体より中性化速度係数は大きい値を示している。これは円柱の方が乾燥しやすく，かつ炭酸ガスが中心に向かって進行するためと考えられる。寸法を比較すると，角柱供

表 - 5 促進中性化試験結果

試験機関	供試体の設置位置	中性化深さ (mm)			
		9 週	平均	16 週	平均
A	上	10.5	11.2	14.5	14.9
	左	13.2		17.1	
	中央	10.8		14.9	
	右	9.3		12.4	
	下	12.2		15.6	
B	上	13.5	12.7	16.4	14.8
	左	13.5		14.3	
	中央	12.4		15.6	
	右	11.5		14.3	
	下	12.5		13.4	
C	上	11.0	11.9	16.1	15.4
	左	12.4		15.6	
	中央	13.9		15.1	
	右	11.0		15.6	
	下	11.3		14.8	
D	上	8.6	10.1	12.2	13.8
	左	8.6		14.5	
	中央	10.0		14.8	
	右	12.5		15.0	
	下	10.8		12.7	
E	上	11.7	12.0	15.5	15.9
	左	11.5		14.7	
	中央	12.7		17.2	
	右	11.7		14.6	
	下	12.2		17.7	
総平均	-	11.6	-	15.0	

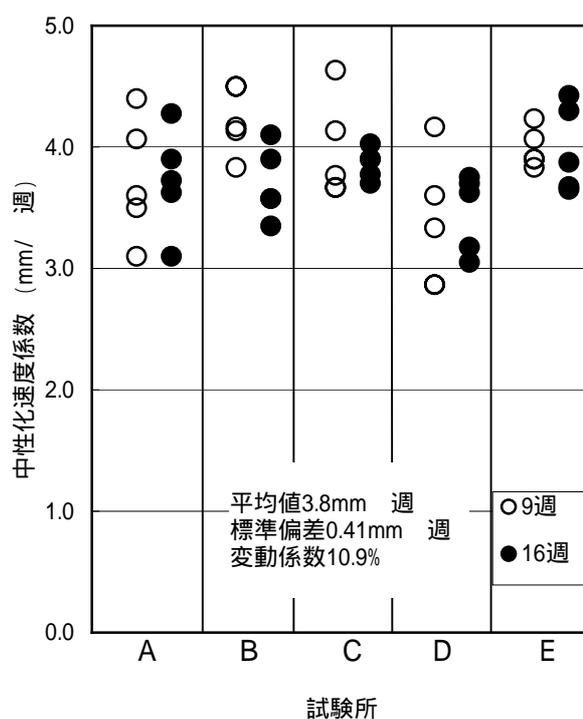


図 - 1 試験所別の中性化速度係数

表-6 各種要因における試験結果

要因		調査記号	供試体形状・寸法 (cm)	番号	中性化深さ (mm)						
					促進中性化期間						
					9 週		16 週		25 週		
						平均		平均	平均		
形状・寸法		65	10 × 10 × 20	1	13.4	14.0	-	-	22.0	22.1	
				2	14.2		-		22.1		
				3	14.4		-		22.3		
			15 × 15 × 26		15.2	1	14.3	-	-	24.8	22.9
						2	15.3	-	21.7		
						3	16.1	-	22.3		
			10 × 20		15.5	1	15.0	-	-	22.3	23.9
						2	15.9	-	24.3		
						3	15.5	-	25.1		
			15 × 15		16.2	1	16.5	-	-	20.9	23.5
						2	16.7	-	25.7		
						3	15.3	-	23.8		
シール	2面開放	65	10 × 10 × 20	1	13.4	14.0	-	-	22.0	22.2	
				2	14.2		-		22.4		
				3	14.4		-		22.3		
			15 × 15 × 26		15.2	1	14.3	-	-	24.8	22.9
						2	15.3	-	21.7		
						3	16.1	-	22.3		
	4面開放		15.9	1	16.2	-	-	26.3	25.6		
				2	15.3	-	24.9				
				3	16.3	-	25.6				
	15 × 15 × 26		14.8	1	15.0	-	-	22.4	22.4		
				2	15.1	-	22.7				
				3	14.4	-	22.1				
はく離剤の有無	有り	65	10 × 10 × 20	1	13.4	14.0	-	-	22.0	22.1	
				2	14.2		-		22.1		
				3	14.4		-		22.3		
	無し			14.1	1	14.5	17.8	18.0	-	-	
					2	12.8	18.5	-			
					3	13.9	17.8	-			
	有り		15.4	4	15.2	-	-	22.2	22.9		
				5	13.2	-	24.2				
				6	14.9	-	22.4				
	無し		10 × 20	15.9	1	15.9	-	-	24.3	25.5	
					2	14.9	-	25.1			
					3	15.5	-	27.1			
有り		15.9	1	15.4	-	-	25.9	24.8			
			2	16.3	-	24.1					
			3	16.0	-	24.3					
バッチ間	55	10 × 10 × 20	7.7	1	6.7	8.3	10.4	-	-		
				2	7.6	9.9	-				
				3	8.9	12.9	-				
				4	7.9	-	11.8				
				5	7.6	-	11.3				
				6	7.3	-	13.0				
	55		8.1	1	8.8	10.7	10.7	-	-		
				2	7.1	10.5	-				
				3	7.9	11.0	-				
				4	8.2	-	13.6				
				5	8.2	-	12.8				
				6	8.1	-	12.5				
	65		12.9	1	12.4	-	-	22.5	20.5		
				2	12.0	-	20.5				
				3	14.4	-	18.4				
	65		14.0	1	13.4	-	-	22.0	22.2		
				2	14.2	-	22.4				
				3	14.4	-	22.3				

試体で中性化速度係数は、大きくなる傾向を示しているが、円柱供試体は寸法に関係なく中性化速度係数は同程度の値を示している。

供試体の高さで中性化速度係数の関係を図-3に示す。角柱供試体、円柱供試体ともに供試体高さが高くなるほど、促進期間に関わらず、中性化速度係数は大きくなる傾向を示した。これは用いたコンクリートのスランプが目標より軟らかめであり、供試体作製時のブリーディングの発生に伴い、供試体の上層でコンクリート内部が粗となったことに起因すると考えられる。

供試体断面積と中性化速度係数の関係を図-4に示す。9週においては断面積にかかわらず中性化速度係数はほぼ一定であるが、25週では、断面積が大きくなると中性化速度係数は小さくなる傾向が認められ、長期材齢になると断面寸法の影響が出るものと考えられる。これらは、断面寸法が10×10cmと15×15cmものものとを比較した既往の研究³⁾で報告されている結果と同様の傾向といえる。

以上の結果から、本実験で用いた形状・寸法の供試体であれば10×10cmの断面を有する供試体よりも中性化速度係数が小さくなる形状・寸法のものは認められないため、安全側の評価を与えることを前提として、試験に適用できると考えられる。

(2) シールの影響

シールの有無と中性化速度係数の関係を図-5に示す。10×10×20cmの供試体では2面開放より4面開放の方が中性化速度係数は大きな値を示しているが、15×15×26cmの供試体では明確な差は認められなかった。このことから供試体にシールを施さない場合には、中性化速度係数は安全側の結果を示しているため、シールを施さずに試験に供する方法も考えられる。しかし、供試体寸法が小さい場合には図-6に示すように、中性化の進行に伴い、測定箇所における中性化部分が連続して、10~15mm間隔で5点測定するということができなくなったり、中性化深さが大きく測定される結果となる。したが

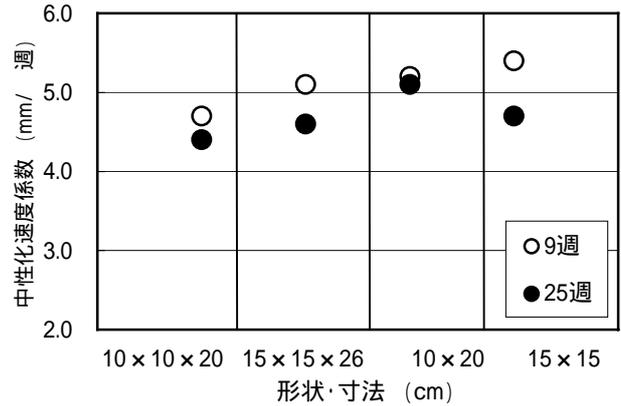


図-2 中性化速度係数と寸法・形状の関係

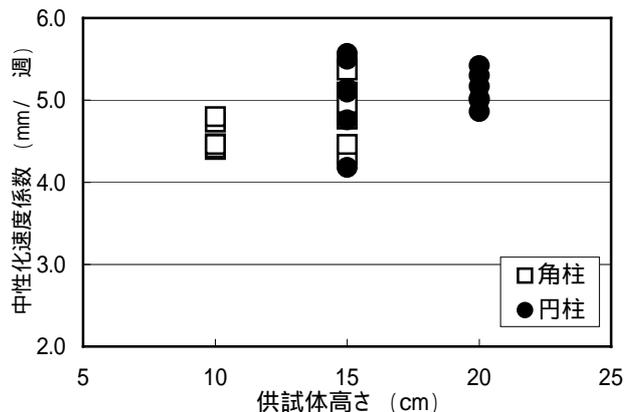


図-3 中性化速度係数と供試体高さの関係

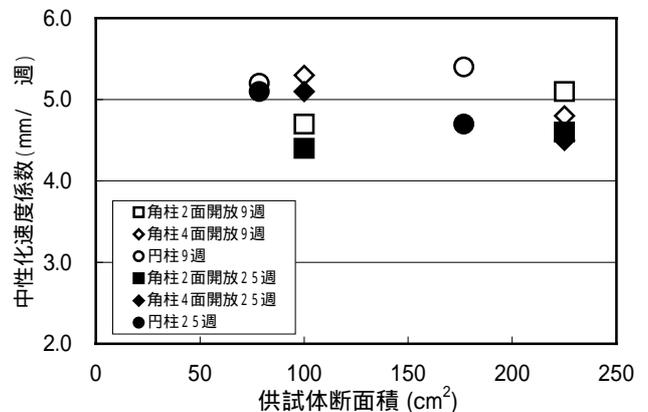


図-4 中性化速度係数と供試体断面積の関係

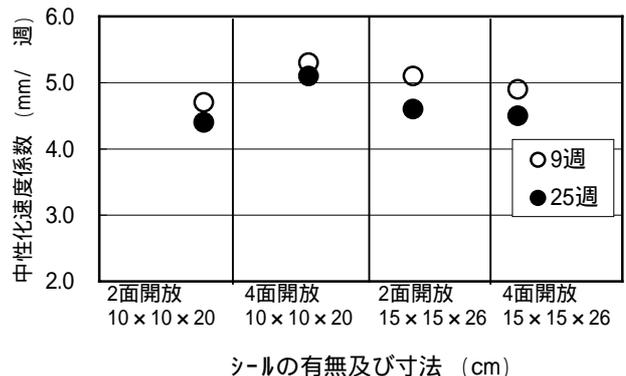


図-5 シールの有無と中性化速度係数の関係

って、あらかじめ中性化深さが大きくなると予測できる供試体や不明なものについては、供試体断面の寸法を十分に確保するか、シールを施す必要がある。

(3) 型枠はく離剤の影響

はく離剤の影響に関しては、表 - 6 および図 - 7 に示すように、ほとんど差は認められなかった。

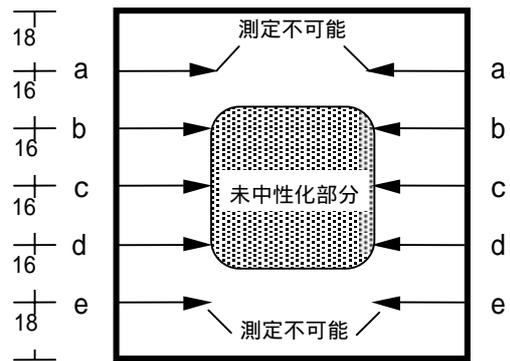
(4) バッチ間の影響

バッチ間の影響に関しては、2 バッチの比較ではあるが表 - 6 および図 - 8 に示すように、ほとんど差は認められなかった。

5. まとめ

今回の実験結果から以下の知見が得られた。

- (1) 5カ所の試験所で共通試験を行った結果、全データの中性化速度係数の標準偏差は 0.5 mm/ $\sqrt{\text{週}}$ 程度、変動係数は 10%程度であった。試験所間のバラツキの一因として、試験装置内の湿度および炭酸ガス濃度の試験期間中の変動が考えられ、トレーサビリティの方法を規定する必要がある。
- (2) 角柱供試体については、供試体寸法がやや大きいものの方が中性化速度係数が大きくなった。円柱供試体については明瞭な傾向は見られなかった。
- (3) シールを施した供試体よりシールを施さない供試体の方が、中性化速度係数は大きくなる、もしくは同程度である結果が得られた。このことから、促進中性化試験結果に基づいて耐久性評価を行う場合には、供試体の断面寸法が大きい場合、すなわち、中性化が進行しても測定点数が確保できる寸法であれば、シールを施さなくてもよいといえる。
- (4) 型枠はく離剤の影響、バッチ間の影響については顕著な差が認められなかったが、これについては水準を増やしてのさらなるデータの収集が必要である。



単位：mm

図 - 6 中性化深さの測定位置

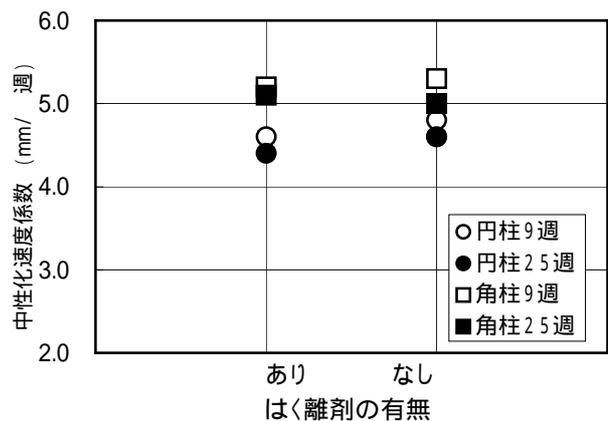


図-7 型枠はく離剤の影響

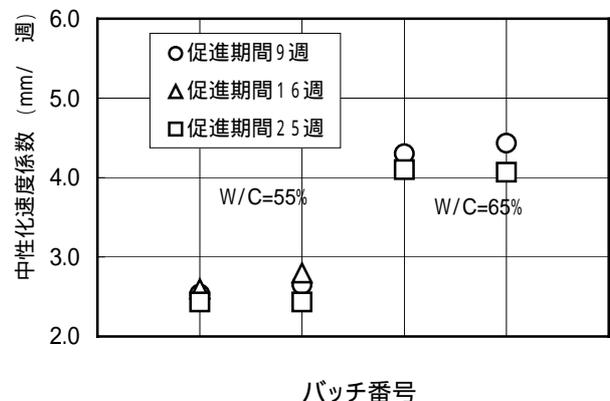


図-8 バッチ間の差

謝辞

実験に際し増田陽子氏（工学院大学建築都市デザイン学科学学生）の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

なお、この研究は文部科学省「学術フロンティア推進事業」の課題の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 押田文雄, 浅井達也, 和泉登志, 高 秀雄: フェノールフタレイン法によるコンクリートの中性化深さ測定法に関する2,3の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.197-198, 1983.9
- 2) 近藤照夫, 森永 繁: コンクリートの炭酸化判定方法に関する問題点と考察, 清水建設研究所報, pp.15-22, 1974.10
- 3) 柳 啓, 友沢史紀, 榊田佳寛, 阿部道彦, 田中 育, 和泉登志: コンクリートの中性化進行予測に関する実験 その2. 中性化速度に及ぼす骨材・セメント種別の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.247-248, 19