

[37] 低温環境（0～-10℃）下におけるコンクリートの強度発現性に関する実験的研究

正会員 ○西条 修（日曹マスタービルダーズ中央研究所）
 正会員 増川 勲（日曹マスタービルダーズ中央研究所）
 正会員 能町 宏（日曹マスタービルダーズ中央研究所）
 正会員 児玉和巳（日曹マスタービルダーズ中央研究所）

1. まえがき

寒冷期におけるコンクリートの通年施工は、技術的にも経済的にも問題があり、各所で調査研究が行われている。従来から寒中コンクリート用混和剤として、一般にAE減水剤促進形が用いられているが、温度条件が厳しい場合は十分な初期養生等を行わないと、コンクリートに所要性能が得られない危険性がある。また、防凍剤や耐寒剤と称されているものは使用実績も少なく、塩化物を主成分としていることから、鉄筋の発錆面でも限界がある。今回、寒冷期におけるコンクリートの施工に対し、打設後の加温養生を行わなくとも、気温が0～-10℃程度であれば、通常のシート養生を行うだけで所要の性能が得られる無塩化物タイプの寒冷期用特殊混和剤を開発した^{1),2),3)}。本報告は、この特殊混和剤を用いたコンクリートについての強度発現性と耐凍害性を試験するとともに、低温環境下での強度発現機構をセメント硬化体の組織構造の面から検討を加え、その解明を試みたものである。

2. 実験概要

2.1. セメントペーストの低温時での強度発現機構

2.1.1. 使用材料：セメントはA社製普通ポルトランドセメントで、その物理的、化学的性質は表-1,2のごとくである。混和剤は寒冷期用特殊混和剤（以下混和剤Aと称する）であり、高性能減水剤と含窒素無機塩を主成分とする比重1.40、pH 8.9の液状品を用いた。練り混ぜ水はイオン交換水を使用した。

2.1.2. 試験方法：凍結温度はセメントペースト中に温度センサーを挿入し、-18℃に調節した電子制御低温槽内に浸せきして測定した。圧縮強度はJIS R5201セメントの物理試験方法の強さ試験に準拠して行った。なお、硬化体は全て水セメント比30%、練り上り温度10±2℃で作製し、成型後直ちに各温度で所定材令まで封かん養生した。結合水量の測定には、強度試験用に練り混ぜたセメントペーストの一部を用いた。所定の材令まで養生した硬化体をエタノール中で細かく粉砕したのち、デシケーター内で減圧しながら硬化体中の遊離水をエタノールで置換して水和反応を止めた。これを減圧乾燥して950℃における減量を測定して結合水量とした。硬化体の微細組織に関する試験は、結合水量の測定で調節した硬化体から5mm程度の塊状試料を選び、細孔径分布は水銀圧入式ポロシメーターを用い、内部組織の観察は硬化体の破断面を走査型電子顕微鏡を用いて行った。

2.2. コンクリートの強度発現性および耐凍害性

2.2.1. 使用材料：セメントは三銘柄の普通ポルトランドセメントを等量混合して用いた。粗骨材は最大寸法25mmの硬質砂岩砕石（比重2.64、吸水率0.71%、単位容積重量1.60kg/ℓ、実積率61.0%、粗粒率6.95）で、細骨材は大井川産の川砂（比重2.62、吸水率1.52%、単位容積重量1.76kg/ℓ、粗粒率2.73）を用いた。混和剤は既述の特殊混和剤Aをセメント100kg当り3～5ℓ使用した。なお、対比として寒中コンクリートで常用されているリグニン系のAE減水剤促進形Pを、セメント重量の0.5%使用した。

2.1.2. 実験計画：表-3の実験計画に基づいてスランブ12cm、空気量5.5%の中練りコンクリートとした。

表-1 セメントの物理試験結果

試料	日本規格 種別	容積			比表面積 m ² /kg	比重	水分			乾燥減量		
		実容積 cm ³	実容積 cm ³	実容積 cm ³			自由水 %	結晶水 %	乾燥後 %	乾燥後 %	乾燥後 %	
316	3190	281	2.75	3.42	3	255	30	57	7.6	1.68	27.0	111

表-2 セメントの化学試験結果

成分名	単位	値	成分名	単位	値	成分名	単位	値	成分名	単位	値
SiO ₂	g loss/g	59.5	Al ₂ O ₃	g loss/g	3.7	Fe ₂ O ₃	g loss/g	1.0	CaO	g loss/g	61.1
SiO ₂	g loss/g	59.5	Al ₂ O ₃	g loss/g	3.7	Fe ₂ O ₃	g loss/g	1.0	CaO	g loss/g	61.1
SO ₃	g loss/g	2.50	Na ₂ O	g loss/g	0.7	MgO	g loss/g	0.1	SO ₃	g loss/g	2.6
			N ₂ O	g loss/g	0.7						

2.1.3. 試験方法：スランプ、空気量はJISA 1101 およびJISA 1128，圧縮強度試験体の作製ならびに試験はJISA A 1132およびJISA 1108 によった。ただし冷却した試験体は20℃の水中に約2時間浸漬したのち試験を実施した。凍結融解試験はASTM C 666 のA法によった。なお，自然環境条件をシミュレートした温度サイクルを図-1に示す。

3. 実験結果

3.1. セメントペーストの低温時での強度発現機構

3.1.1. 凍結温度と混和剤Aの添加量との関係

図-2は練り混ぜ直後のセメントペーストの凍結温度が，混和剤Aの添加量の増大とともに直線的に低下する状況を示したもので，併記した混和剤Aの単独液の凍結温度も濃度に比例して低下している。図-3はペーストの練り置き時間を変えた場合の結果であり，混和剤無添加では5時間まで変化は見られないが，それ以降になると時間とともに僅かずつ低下する傾向が見られる。混和剤Aを添加したときにも同様の傾向が見られるが，低下割合は無添加よりもかなり大きい。混和剤Aを添加したセメントペーストの凍結温度は，遊離水中の溶存濃度に左右されると見なされるので，遊離水が結合水として消費されてゆく過程で，混和剤Aの主成分は溶存し続け，且つ濃縮されてゆくことが，無添加に比べて凍結温度の低下割合を大きくしている原因と判断される。

3.1.2. セメント硬化体の強度ならびに結合水量と養生温度

表-4に異なる温度で養生した硬化体の強度と結合水量との関係を示した。混和剤無添加の場合，養生温度の低下とともに強度発現は悪くなり，-10℃では強度の増大が見られない，混和剤Aの場合，養生温度の低下はセメントの硬化速度を遅延させるのみで，材令の進行に伴って強度増進と結合水量の増加がある。図-4は表-4の関係を図示したもので，混和剤Aを添加した硬化体の強度と結合水量の間には，無添加のそれと比較して特異性は認められない。したがって，低温環境（0～-10℃）下における強度発現様式には，通常の混和剤無添加の場合に比べて特別に異なる点は無いものと推察される。

3.1.3. セメント硬化体の微細構造

図-5に材令7日の硬化体の細孔径分布を，また，写真-1に走査型電子顕微鏡写真を示した。混和剤無添加の5℃養生の硬化体では，主な細孔径は75Å～430Åに分布し，分布のピークは240Å～430Åにある。-5℃養生では細孔径分布のピークは2400Å～4300Åに変わり，主な細孔径分布域も広くなっている。また，全細孔容積も-5℃養生の方が大きい。写真-1の混和剤無添加の-5℃養生の硬化体では，独立したセメント粒子が多数存在していて，粒子間隙は水和物で埋められていない。他方，混和剤Aを添加した場合では，硬化体の細孔分布は-5℃養生あるいは-10℃養生でも無添加の5℃養生のそれとほとんど変わりなく，全細孔容積も小さい。これらの硬化体の内部組織は写真-1に見られるごとく，セメント粒子間は水和物で密実に埋められ，良好な網状組織の形成が確認される。

表-3 検討項目および実験の組み合わせ

検討項目	養生温度 ℃	養生条件		凍結融解 回数	凍結融解 温度 ℃	凍結融解 時間 hr	凍結融解 後の強度 MPa	凍結融解 後の結合水量 %	凍結融解 後の細孔径分布
		養生時間 hr	養生湿度 %						
凍結融解試験	5	12	100%	1	5	12	28.0	17.1	図-5
	10	12	100%	1	5	12	37.0	16.5	
凍結融解試験	5	12	100%	1	5	12	31.8	15.5	図-5
	10	12	100%	1	5	12	21.0	14.9	
凍結融解試験	5	12	100%	1	5	12	37.0	16.5	図-5
	10	12	100%	1	5	12	37.0	16.5	

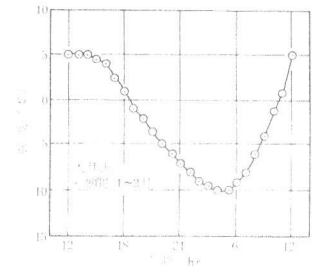


図-1 温度サイクル試験に用いた温度履歴

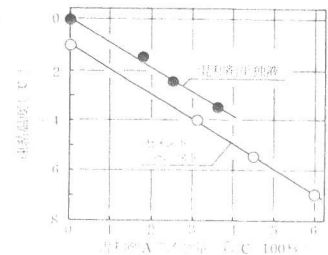


図-2 セメントペーストの凍結温度と混和剤Aの添加量との関係

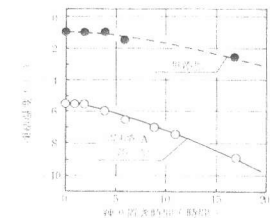


図-3 セメントペーストの練り置き時間と凍結温度との関係

表-4 セメント硬化体の強度と結合水量

養生温度 ℃	材料	強度 (MPa)					
		7日	14日	28日	56日	91日	126日
5	無添加	38.1	10.0	62.3	11.5	77.1	17.1
	混和剤A 66.7C-100%	11.1	12.1	51.4	14.8	37.7	16.5
-5	無添加	13	9.2	26.8	8.7	58.4	12.1
	混和剤A 66.7C-100%	13.0	18.3	11.7	13.2	51.6	15.5
-10	無添加	3.1	3.1	25.0	5.8	18.6	8.9
	混和剤A 66.7C-100%	3.1	3.1	25.0	12.1	11.6	11.6

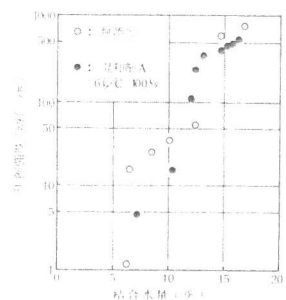


図-4 セメント硬化体の強度と結合水量の関係

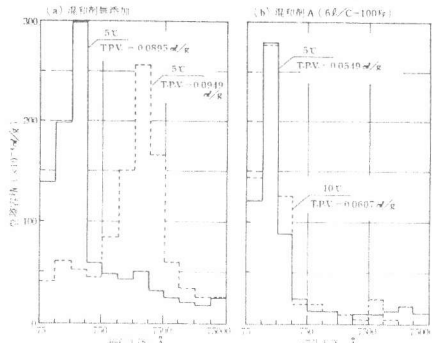


図-5 セメント硬化体の細孔径分布(材令7日)

4.1. コンクリートの強度発現性および耐凍害性

4.1.1. 単位セメント量および使用量と圧縮強度の関係

試験結果は表-5~6に示すとおりで次のようなことがいえる。

1) 混和剤Aを3ℓ/C=100kg用いるとAE減水剤促進形と同等な減水率が得られ、使用量1ℓ/C=100kgの増加につき、単位水量が2%づつ減少する。

2) 混和剤Aを4ℓ/C=100kg用いたコンクリートの圧縮強度は標準養生に比べ環境温度-5℃では材令7日で44~51%, 材令28日では36~62%, また、5ℓ/C=100kg用いた環境温度-10℃の場合では、材令7日で21~34%, 材令28日では22~40%であり、コンクリートでも前項と同様に-5℃および-10℃の環境下で水相が進行し得ることを示している。なお、AE減水剤Pの場合は、-5℃では14%, -10℃では6%であった。

3) セメント水比と圧縮強度の関係は図-6および表-7に示す。これらの結果で明らかのように-5℃および-10℃で28日間冷却し、その後5℃および20℃で養生したコンクリートの圧縮強度は標準養生の場合と同等以上に回復すること、また、冷却した場合での強度もセメント水比と密接に関係すること、等が認められている。

4) 混和剤使用量と圧縮強度の関係を図-7に示すが、いづれも使用量が多くなるほど増大する。28日間冷却時の強度発現とその後5℃、または20℃養生した場合の強度増進を考慮すれば、-5℃および-10℃に約28日間さらされるコンクリートに対する適当な使用量は、それぞれ3~4ℓ/C=100kgおよび5~6ℓ/C=100kgと考えられる。

4.1.2. 前養生時間と圧縮強度および耐凍害性

5℃および10℃で前養生を行った後、環境温度-5℃および-10℃における強度と耐凍害性について検討した結果を表-8に示す。

1) 前養生温度が5℃と10℃ではほとんど変わらないが、練り混ぜ後ただちに冷却した場合に比べ5℃で4時間の前養生をすると強度は30~45%増大する。なお、前養生時間をさらに延長しても強度の伸びは期待できない。

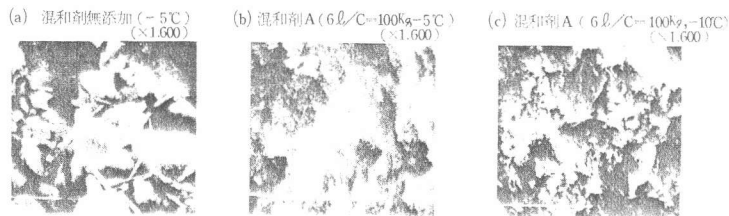


写真-1 セメント硬化体の走査型電子顕微鏡写真(材令7日)

表-5 単位セメント量および混和剤使用量と圧縮強度の関係(その1)
(コンクリートの配合と標準養生での圧縮強度)

前養生時間 hr	単位セメント量 kg/m ³	種類	混和剤		W/C	S _{0.3} a	単位水量		空気量	空気率	圧縮強度 (kg/cm ²)		
			使用量 ℓ/C=100kg	率			7日	28日			7日	28日	
12	280	A	4	55.0	43	15.1	10.5	5.7	18.1	26.3	35.6		
			5	54.8	15.1	12.0	5.3	18.3	25.6	33.8			
			5	47.6	15.7	10.0	15.5	5.4	22.3	31.0	40.7		
	330	A	4	46.7	42	15.1	9.8	11.0	5.8	23.1	31.6	41.8	
			5	45.8	15.1	9.6	11.0	3.2	24.8	37.8	41.8		
			6	41.8	11.8	9.1	11.5	5.4	26.8	33.0	41.9		
380	A	4	41.8	11	15.0	13.0	5.0	28.2	36.2	46.0			
		5	41.1	15.6	12.0	5.6	29.2	37.0	45.1				
330	P	C=0.5%	47.6	42	15.7	10.0	11.5	5.2	23.5	32.2	41.0		

(注) ① 冷却時間: 28日 (-5~-10℃)

表-6 単位セメント量および混和剤使用量と圧縮強度の関係(その2)
(-5, および-10℃で連続冷却した圧縮強度)

前養生時間 hr	冷却時間 hr	冷却温度 ℃	単位セメント量 kg/m ³	種類	W/C	圧縮強度 (kg/cm ²)		備考		
						7日	28日			
12	-5	280	A	4	55.0	8.4	15	13.6	3.8	
				3	47.6	10.2	23	15.8	2.6	
				3	46.7	13.9	31	19.8	4.7	
		330	A	5	45.8	15.9	48	25.1	6.2	36.2, 42.0, 49.0
				4	41.8	18.3	51	28.2	6.2	
				380	4	41.8	18.3	51	28.2	6.2
	-10	280	P	C=0.5%	47.6	42	6.3	11		
					5	54.0	5.7	21	15.9	2.2
					4	46.7	6.6	21	9.1	2.3
		330	A	5	45.8	8.6	26	12.6	3.0	32.6, 38.0, 40.1
				6	41.8	11.2	31	17.0	4.1	
				380	5	41.1	12.5	34	18.2	4.0
330	P	C=0.5%	47.6	42	25.7	6				

① 冷却時間: 28日 (-5~-10℃)
 ② * 45.8kg/m³ (5.9%), 2.81 (10.9%)
 ③ * 46.7kg/m³ (6.0%), 2.81 (10.9%)
 ④ * 41.8kg/m³ (5.4%), 2.81 (10.9%)

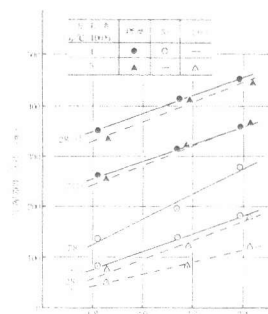


図-6 セメント水比と圧縮強度の関係

表-7 セメント水比と圧縮強度の関係

単位セメント量 kg/m ³	養生温度 ℃	C/W=0.494	
		材令7日	材令28日
4	5	23.5 + 17.5 C/W	33.1 + 25.5 C/W
	20	5.3 + 17.3 C/W	21 + 18.3 C/W
	10	18.3 + 12.6 C/W	27.0 + 18.8 C/W
	20	11.6 + 20.1 C/W	2.6 + 19.6 C/W

2) 前養生を5℃で4および12時間行った後、-5℃で28日間冷却したコンクリートの耐久性指数は、前養生4時間で54%、12時間で100%であり、所要の空気量と前養生時間が適当であれば耐凍害性は確保できる。

4.1.3. 自然環境条件をシミュレートした温度サイクルにおける強度発現と耐凍害性

5℃⇔-10℃の温度サイクルを繰り返した場合の強度と耐凍害性を検討した結果を表-9に示す。

1) 混和剤Aを用いた材令7日および28日強度は、標準養生に対してそれぞれ49~55%、60~68%で対比の混和剤Pより5L/C=100kg/m³使用で81~112 kg/m³、約75~65%大きい。

2) 混和剤Aを4L/C=100kg/m³用いたコンクリートの耐久性指数は93%で、十分な耐凍害性を示した。

4. まとめ

新たに開発した寒冷期用特殊混和剤Aに関する本実験結果から次のようなことが明らかになった。

1) セメントペーストの低温時での強度発現機構

混和剤Aを添加したセメントペーストの凍結温度は添加量の増大とともに低下し、-4~-7℃となる。また、セメント硬化体の-5℃および-10℃での強度発現は材令とともに増大し、正常な水和反応が見られ細孔径分布は無添加の5℃と同等で全細孔容積も小さく、走査型電子顕微鏡観察においてもセメント粒子間は水和物で密実に埋められていることが認められた。

2) コンクリートの強度発現性および耐凍害性

混和剤Aの3L/C=100kg/m³使用でA/E減水剤促進形と同等な減水率が得られ、標準養生強度に比べ

4L/C=100kg/m³用いた-5℃および5L/C=100kg/m³用いた-10℃の材令28日強度はそれぞれ36~62%および22~40%得られる。また、28日間冷却後、実気温を想定した養生条件における材令6カ月強度は標準養生の材令28日と同等となり、正常な強度増進を示した。

なお、ただちに冷却した場合に比べ5℃で前養生を4時間以上とれば30~45%の強度増大となり、耐凍害性も所要の空気量と前養生時間があれば確保できる。

自然環境条件をシミュレートした5℃⇔-10℃の温度サイクルにおける強度発現は材令28日で標準養生の60~68%得られ耐凍害性も良好であった。

参考文献

- 1) 見玉兵か、寒冷期用特殊混和剤A N.F.-28の性能効果に関する実験的研究，材料，1983. 2
- 2) 日曹マスタービルダーズ研究所報，No. 4, 1981
- 3) 同上 No. 5, 1982
- 4) 神田衛，「コンクリートの凍結温度に関する実験」セメント技術年報 XIII, 1966

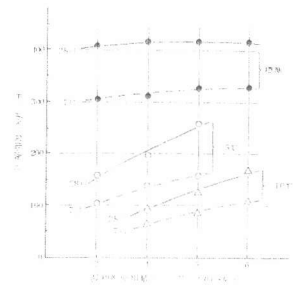


図-7 混和剤使用量と圧縮強度の関係

表-8 前養生時間と圧縮強度の関係

前養生時間 (h)	養生温度 (°C)	標準養生 (kg/cm²)			前養生時間 (h)	養生温度 (°C)	特殊混和剤A (kg/cm³)		
		7日	28日	6ヶ月			7日	28日	6ヶ月
5	0	118	218~237	300	5	0	141	233~61	311
		182	285~344	407			141	233~61	311
		137	131	120			141	233~61	311
	4	156	261~68	370		4	172	256~69	374
		132	170	120			172	256~69	374
		161	259~67	377			172	256~69	374
	12	136	119	120		12	141	233~61	311
		177	289~75	412			141	233~61	311
		150	133	120			141	233~61	311
	24	150	133	120		24	172	256~69	374
		150	133	120			172	256~69	374
		150	133	120			172	256~69	374
10	0	180	300	400	10	0	141	233~61	311
		141	233~61	311			141	233~61	311
		141	233~61	311			141	233~61	311
	4	141	233~61	311		4	172	256~69	374
		141	233~61	311			172	256~69	374
		141	233~61	311			172	256~69	374
	12	141	233~61	311		12	141	233~61	311
		141	233~61	311			141	233~61	311
		141	233~61	311			141	233~61	311
	24	141	233~61	311		24	172	256~69	374
		141	233~61	311			172	256~69	374
		141	233~61	311			172	256~69	374

表-9 5℃⇔-10℃の温度サイクルを繰り返した場合の圧縮強度

試料	前養生時間 (h)	養生温度 (°C)	凍結温度 (°C)	凍結時間 (h)	凍結後養生温度 (°C)	凍結後養生時間 (h)	圧縮強度 (kg/cm²)							
							7日	28日	6ヶ月	1年				
A	3	17.0	-10.0	5	5	24	158	120	87	214	303	394	118	236
							155	120	85	226	325	417	107	260
							150	115	86	240	337	425	107	260
P	3	18.5	-10.0	5	5	24	160	110	83	207	311	408	106	176
							160	110	83	207	311	408	106	176

注: (1) 凍結強度 (2) 凍結後養生強度 (3) 凍結後養生強度 (4) 凍結後養生強度