

論 文

[1018] シリカフュームを使用した高強度コンクリートの物性

正会員○橋 大介（清水建設技術研究所）

正会員 山崎庸行（清水建設技術研究所）

正会員 今井 実（清水建設技術研究所）

1. まえがき

海外では、超高層鉄筋コンクリート建築物等の建設に圧縮強度 1000kgf/cm^2 程度以上の高強度コンクリートを適用する場合、シリカフュームを混和材料として使用するのが一般的になっている。シリカフュームの使用は、今までセメント単味のコンクリートでは困難であった圧縮強度 1000kgf/cm^2 程度以上の場所打ちコンクリートの製造を可能にした。著者らは、富調合低水結合材比のコンクリートにシリカフュームを混入することで混和剤使用量が低減でき、施工性の向上も期待できることを示唆した¹⁾。また、シリカフュームの使用により、コンクリートが密実になることから、耐久性が高くなるとの報告も多い。しかしながら、圧縮強度や耐久性といった物性は使用材料・調合・施工等の良否にかなり左右され、所要の品質を確保するために充分な配慮が必要と考えられる。

本研究は、耐久性確保ということを念頭におき、シリカフュームの使用が高強度コンクリートのフレッシュおよび硬化後の物性に及ぼす影響を明らかにするとともに、耐久性の中の耐凍害性に主眼をおいて実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリート調合

使用材料は、表-1に示すとおりである。混和材料として、シリカフュームは外国産のものを、流動化剤は、スランプロス低減型のものを選定した。

表-2に実験に用いたコンクリート調合例を示す。シリカフュームの混入率は、セメント重量の10%(内割)を中心とした。スランプは、

ベースコンクリートで 10cm 、流動化コンクリートで 23cm を目標とした。

2. 2 実験項目

(1) 練り混ぜ性状試験

シリカフュームを混入した富調合低水結合材比のコンクリートの練り混ぜ性状を確認するために、練り混ぜ時のミキサ負荷電力および積算電力量を測定した。すなわち、練り混ぜの容易さを、ミキサ攪拌抵抗の変化と大きさによって判定するものとした。

練り混ぜにはパン型強制練りミキサ(容量 100ℓ)を用い、空練りしながら水を投入し、水投入後、ベースで3分間、流動化剤を添加して2分間の練り混ぜを行った。

表-1 使用材料

使用材料		種類	物性 および 成分	
合CB 材	セメント C	普通	比重=3.16, 比表面積(ブレーン値)= $3180\text{cm}^2/\text{g}$	
	混和材 SF	シリカフューム (微粉末)	比重=2.13, 比表面積(BET値)= $16.2\text{m}^2/\text{g}$, $\text{SiO}_2=97.1\%$	
	細骨材 S	鬼怒川産川砂	表乾比重=2.59, 吸水率=2.14%, 粗粒率=2.64	
骨 材	粗骨材 G	青梅産碎石 (硬質砂岩)	最大寸法=20mm, 表乾比重=2.67, 吸水率=0.61%, 粗粒率=6.60, R.S. 破砕値=13.4%	
	混和剤	高性能減水剤	主成分=ポリアルキルアリルスルホン酸塩	
		空気連行剤(AE)	主成分=天然樹脂酸塩	
		流動化剤	主成分=ポリアルキルアリルスルホン酸塩	
水		水道水	-	

表-2 コンクリートの調合

W/CB (%)	s/a (%)	W	単位量 (kg/m^3)				混和剤 × CB weight%		
			結合材 CB		細骨材	粗骨材	高性能 減水剤	AE剤	流動化 剤
			水	セメント C					
22	37	150	616	69	587	1031	1.8	-	0.6
25	38	150	540	60	631	1061	1.7	-	0.6
28	39	150	481	54	669	1079	1.7	-	0.5

なお、コンクリート単位容積当たりの負荷電力および積算電力量は、ミキサ空転時の負荷を差引いて算定した。

(2) 打込み直後の養生方法の検討

一般のコンクリートでも、打込み直後に乾燥作用を受けると、プラスチック収縮ひびわれを発生する場合がある。富調合低水結合材比で、かつ、シリカフュームを使用したコンクリートでは、単位水量が少なく、ブリージングも殆ど生じないことから、特にこのひびわれが発生しやすいと考えられる。そこで、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の型枠にコンクリートを打込み、外部環境条件と打込み面の養生方法を要因として、プラスチック収縮ひびわれの防止方法について検討した（表-3参照）。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度および耐凍害性に影響を及ぼす要因として、空気量および打込み時から硬化初期にかけての養生温度（以下、初期養生温度という）が考えられる。そこで、空気量を1～7%、初期養生温度を15～35°Cと変化させた場合の圧縮強度への影響について検討した。空気量に関しては、AE剤により連行されるエントレインドエアと、施工時に巻込む気泡を想定した径の大きいエントラプトエアの影響を調べた。径の大きいエントラプトエアを含む供試体は、 $\phi 10\text{mm}$ の発泡スチロール球をコンクリートに混ぜて作製した。なお、本実験における初期養生期間は、打込み直後から脱型する材令2日までとした。脱型後は、標準養生とした。

(4) 凍結融解試験

空気量、初期養生温度および凍結融解試験方法を要因として、凍結融解試験を行った。供試体は、初期養生後、標準養生か気乾養生（ $20 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%$ RH）し、試験材令を14日とした。凍結融解試験方法は、ASTM C 666 A法に準拠した急速水中凍結融解試験方法と気中凍結融解試験方法の2方法とした。気中凍結融解試験用の供試体は、供試体が乾燥しないように、試験開始前に包装用ラップフィルムでシールした。また、リニアトラバース法により硬化コンクリートの気泡組織の測定（ASTM C 457）も併せて行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 練り混ぜ性能

各種調合の練り混ぜによるミキサ負荷電力および積算電力量の測定結果を図-1、2に示す。水結合材比が22、28%でシリカ

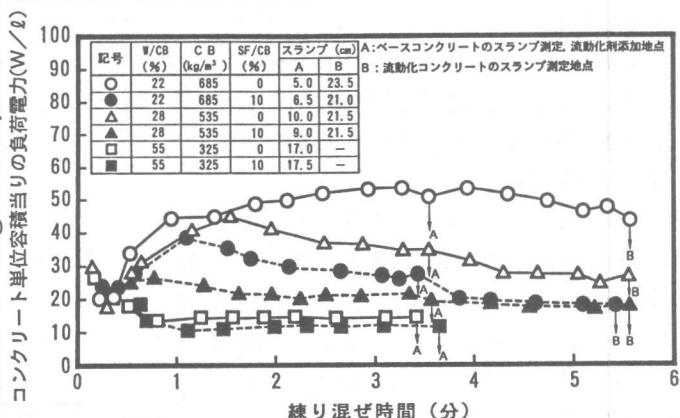


図-1 ミキサ負荷電力の経時変化

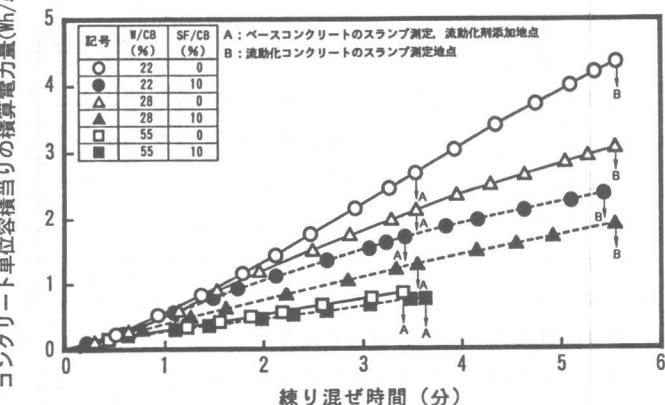


図-2 練り混ぜによるミキサ積算電力量

フュームを使用しない調合では、水結合材比55% のものに比較して、負荷電力は、著しく大きくなつた。しかし、シリカフュームを混入することで、負荷電力を大幅に低減できた。それと同時に、負荷電力がピーク値を経て、低下・安定するまでの所要時間も短くなつた。ほぼ同一のスランプ、練り混ぜ時間で消費される電力量を比較すると、水結合材比22、28% では、シリカフュームを混入することで56~62% に電力量を低減できた。一方、水結合材比が55% の場合、シリカフュームの混入による負荷電力および積算電力量の顕著な相違は認められなかつた。したがつて、富調合低水結合材比のコンクリートにシリカフュームを混入することにより、効率よく均一に練り混ぜができるものと考えられる。このような結果になつたのは、既に報告したように¹⁾、シリカフュームがセメント粒子間を充填し、あたかも水のように作用したため等によるものと考えられる。

3. 2 打込み直後の養生方法の影響

養生方法の相違が、プラスチック収縮ひびわれ発生に及ぼす影響に関して検討し、表-3 および写真-1 に示す結果が得られた。打込み面を養生しない場合、多少、循環空気の流れのある恒温室下(20°C、85% RH) では、約1/4 の供試体に軽微なひびわが認められた。一方、強制加熱(35 °C) および強制送風下(風速 2~4m/s、20°C) になると、全ての供試体の表面と内部にひびわが発生し、0.7mm 程度以上のひびわ幅を有していた。しかしながら、打込み面をビニールシート養生、湿布養生および被膜養生することでひびわれの発生を防止田できた。さらに、簡易な仕上げを行う場合を想定して、打込み後60分間湿布養生し、30分間打込み面を強制加熱および強制送風下に暴露し、その後被膜養生を行つた供試体には、ひびわれは、認められなかつた。

表-3 養生方法がプラスチック収縮ひびわれ発生に及ぼす影響

外部環境条件	打込み面の養生方法	ひびわれの有無
(20 °C, 85%RH)	無(打込み面暴露)	有り(約1/4、軽微)
	シート養生	無
	湿布養生	無
(温度35°C)	無	有り(全数、長さ・幅とも大)
	シート養生	無
	湿布養生	無
(風速=2~4m/s, 20°C)	被膜養生(合成樹脂エマルジョンAS)	無
	無	有り(全数、長さ・幅とも大)
	被膜養生(合成樹脂エマルジョンAS)	無

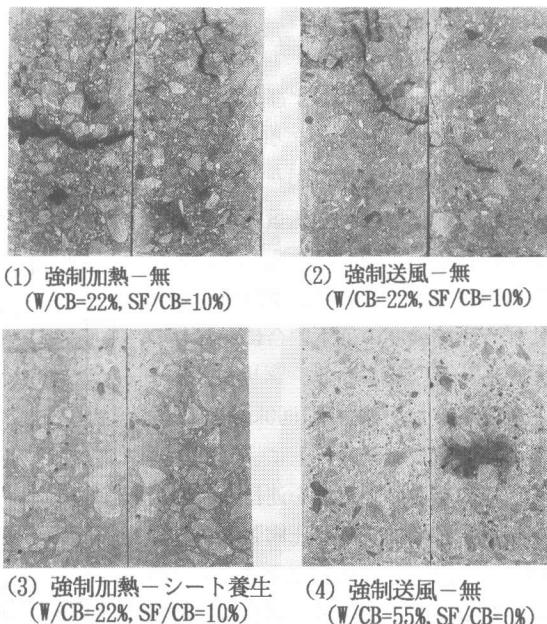


写真-1 プラスチック収縮ひびわれ発生状況

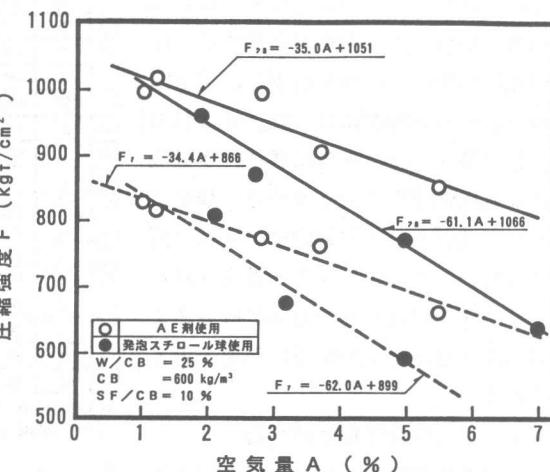


図-3 空気量が圧縮強度に及ぼす影響

なお、水セメント比55% の場合は、強制加熱および強制送風下において打込み面を養生しなくてもひびわれの発生は認められなかった。したがって、夏期や強風時に、この種のコンクリートを施工する場合、打込み直後の養生が重要であり、強度および耐久性の観点からも、コンクリート表面部の水分逸散を極力少なくするような配慮が必要と考えられる。

3. 3 圧縮強度

(1) 空気量の影響

エントラプトエアおよびエントレインドエアを連行したコンクリートの圧縮強度と空気量の関係を図-3に示す。本実験の範囲では、空気量と圧縮強度の間にはよい相関が認められた。また、空気泡径の大小により、空気量の増加に伴う圧縮強度の低下割合にかなりの差があった。すなわち、シリカフュームを使用した圧縮強度1000kgf/cm²程度の高強度コンクリートに、AE剤により、径の小さい空気泡を連行した場合、空気量が1%増加すると圧縮強度が約35kgf/cm²低下し、低下割合は、3～4%程度になった。この低下割合は、通常言われている値(5%程度)よりもいくぶん小さかった。一方、径の大きい空気泡の場合、空気量が1%増加すると圧縮強度が約60kgf/cm²低下し、低下割合は、6～7%程度になった。すなわち、コンクリート打込み時に巻込む空気泡による圧縮強度の低下割合は、AE剤によって連行される空気泡による低下割合の約1.7倍程度になると推定されることから、空気泡をできるだけ巻込まないような施工上の配慮が必要と考えられる。

(2) 初期養生温度の影響

初期養生温度と圧縮強度の関係を図-4に示す。シリカフュームを使用した高強度コンクリートの材令7日圧縮強度は、初期養生温度の影響が表われず、大差のない結果となった。一方、材

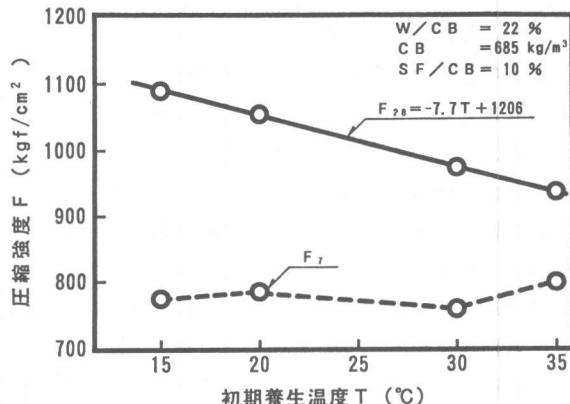


図-4 初期養生温度が圧縮強度に及ぼす影響

表-4 凍結融解試験条件と試験結果

No.	水結合材比	単位結合材量	シリカフューム混入率	スランプ	空気量	初期養生温度 T (°C)	養生方法	凍結融解試験方法	試験結果(300サイクル)		
									標準	水中	重量変化 %
				cm	%						耐久性指標 DF %
1	28	500	10	22.5	*2.1	10(14)	標準	水中	100.0	98.9	
2	25	540	10	23.0	*2.3	10(12)	標準	水中	100.0	97.9	
3	25	540	0	21.5	*1.3	20(21)	標準	水中	99.9	99.7	
4	25	540	25	22.5	*0.2	20(19)	標準	水中	-	18.1	
5	25	540	25	21.5	2.0	20(19)	標準	水中	100.0	100.3	
6	25	600	10	24.0	*2.2	30(36)	標準	水中	-	13.2	
7	22	575	10	21.5	*2.3	10(11)	標準	水中	99.9	96.6	
8	22	685	10	22.0	*2.5	30(36)	標準	水中	-	43.3	
9	22	685	10	20.0	*1.3	36(29)	標準	水中	-	39.8	
10	22	685	10	20.0	3.0	36(29)	標準	水中	100.0	99.9	
11	22	685	0	22.0	*0.8	20(23)	標準	水中	100.0	102.7	
12	22	685	0	22.5	*0.1	35(32)	標準	水中	-	43.0	
13	22	575	10	21.0	1.6	20(20)	標準	水中	99.9	96.9	
14	22	575	10	21.5	4.1	20(22)	標準	水中	99.9	100.8	
15	22	685	10	0.5	* -	20(21)	標準	水中	100.0	87.2	
16	22	685	10	8.0	*1.0	20(22)	標準	水中	100.0	96.3	
17	22	480	10	14.5	3.3	20(21)	標準	水中	99.9	98.4	
18	22	685	10	21.5	*0.7	20(22)	標準	水中	100.0	98.4	
19	22	685	10	20.5	*1.2	35(30)	標準	水中	-	39.8	
20	22	685	10	22.5	1.9	20(21)	標準	水中	100.0	99.0	
21	22	685	10	21.0	1.7	35(30)	標準	水中	100.2	92.8	
22	22	685	10	>25	2.2	20(21)	標準	水中	100.0	96.7	
23	22	685	10	22.0	3.6	20(21)	標準	水中	99.9	95.3	
24	22	685	10	23.5	4.5	35(28)	標準	水中	100.0	95.1	
25	25	600	10	22.0	*0.5	35(28)	標準	気中	99.9	100.3	
26	25	600	10	22.0	*0.5	35(28)	気乾	気中	100.1	100.8	
27	22	685	10	23.0	*0.6	20(22)	標準	気中	99.9	100.5	
28	22	685	10	23.0	*0.6	20(22)	気乾	気中	100.1	101.1	
29	22	685	10	22.5	*0.7	35(29)	標準	気中	100.0	100.5	
30	22	685	10	22.5	*0.7	35(29)	気乾	気中	101.0	63.2	

注1) *印は、non-AEコンクリート(空気量0.1～2.5%)を示す。

注2) 初期養生温度の括弧内の数値は、練り上がり温度を示す。

令28日では、初期養生温度が15、20、30、35°Cと高くなるに伴って、圧縮強度が各々1090、1054、975、938 kgf/cm²と低下する傾向を示した。すなわち、圧縮強度は、初期養生温度が1°C上がるごとに7~8kgf/cm²程度低下する結果となった。圧縮強度500 kgf/cm²程度のコンクリートを用いた既往の実験結果によれば²⁾、初期養生温度が5、10、20、30°Cで、材令28日圧縮強度は、各々576、557、538、465 kgf/cm²であった。これは、初期養生温度が1°C上がるごとに4~5kgf/cm²程度の圧縮強度低下に相当し、シリカフュームを使用した高強度コンクリートの強度低下の方が大きかった。しかしながら、各々のコンクリートの圧縮強度は、1000kgf/cm²と500 kgf/cm²程度であり、圧縮強度レベルを基準とした低下割合で比較すると、むしろ、シリカフュームを使用した高強度コンクリートの強度の低下割合の方がいくぶん小さいようである。いずれにしても、初期養生温度が高くなるコンクリートに関しては、強度低下を少なくするために、打込み温度や養生温度を低くする必要があると考えられる。

3. 4 耐凍害性

(1) 凍結融解試験結果

凍結融解試験結果を表-4および図-5、6に示す。

図-5は、シリカフュームの混入率が10%の高強度コンクリートの急速水中凍結融解試験結果を、空気量と耐久性指数の関係で示したものである。同図によれば、初期養生温度が20°C程度以下の場合、non-AEコンクリートにおいても、耐久性指数が90%以上になった。この結果は、水セメント比が小さい高強度コンクリートは、non-AEコンクリートでも優れた耐凍害性を示す、既往の研究成果^{3), 4)}と一致するものである。一方、初期養生温度が30°C以上のnon-AEコンクリートでは、耐久性指数が40%程度以下と小さくなつた。これは、蒸気養生やオートクレーブ養生したコンクリートの耐凍害性が加熱の影響で低下するという結果⁵⁾と同様に、コン

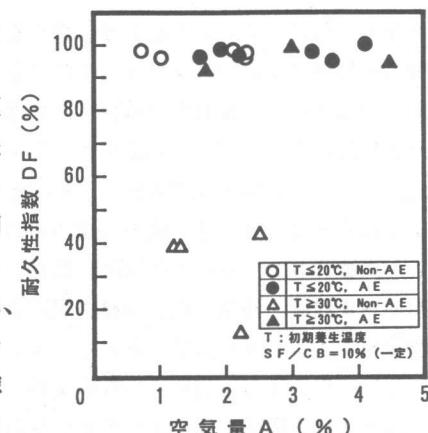


図-5 空気量と耐久性指数の関係
(急速水中凍結融解)

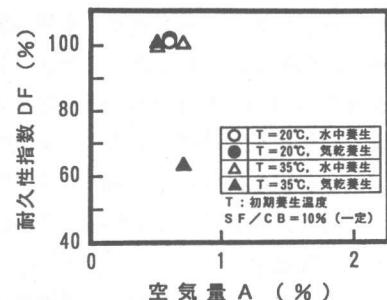


図-6 気中凍結融解試験結果

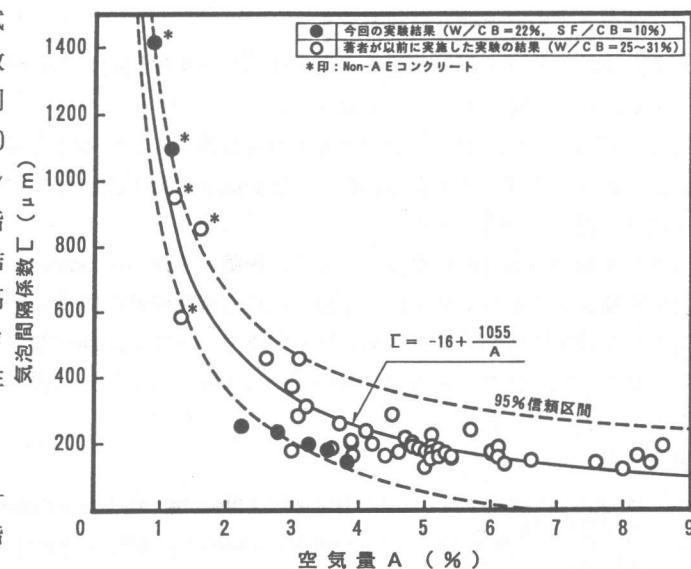


図-7 空気量と気泡間隔係数の関係

-121-

クリート温度が高いことにより、微小き裂が生じやすいためと考えられる。しかしながら、空気量 2% 程度以上のAEコンクリートにすると、初期養生温度が高い場合においても、耐久性指数は 90% 以上となり、優れた耐凍害性が確保された。シリカフュームを10% 混入したnon-AEコンクリートの気中凍結融解試験結果を図-6 に示す。初期養生温度が35°Cで、気乾養生した2 ケースの内、1 ケースの耐久性指数が63.2% であった結果を除けば、耐久性指数は全てのケースでほぼ 100% になっており、全く低下は認められなかった。以上の結果から、シリカフュームを10% 混入した高強度コンクリートの耐凍害性は、non-AEコンクリートでも問題がないとも考えられるが、初期養生温度、養生方法、部材が暴露される環境等によっては、AE剤により、2 ~3%程度以上の空気量にする必要があると考えられる。

(2) 空気量と気泡間隔係数の関係

図-7 は、以前実験により求めた水結合材比25~31% の硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数のグラフ上に、今回の実験結果をプロットしたものである。水結合材比が22% 、シリカフュームの混入率が10% のAE剤を使用した高強度コンクリートの気泡間隔係数は、以前実施した結果に比較して若干小さくなり、空気量2.2 、2.8. 、3.3 、3.6%で、気泡間隔係数は各々254 、234 、198 、180 μm であった。このように空気量が少ないわりに気泡間隔係数が小さくなったのは、低水結合材比であるため、直径の小さい空気泡を連行できたため等と考えられる。なお、AE剤により空気量を2%程度になると、気泡間隔係数は、エントラプトエアの量によっても異なるが、400 μm 程度になると推測される。以上の結果と前述した凍結融解試験結果から、気泡間隔係数が ACI の推奨値200 μm を越えても、優れた耐凍害性が確保できていた。

4. まとめ

シリカフュームを使用した高強度コンクリートの物性に関して、本実験で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 富調合低水結合材比のコンクリートにシリカフュームを使用すると、練り混ぜ性能が向上し、効率よく均一に練り混ぜができる。
- (2) プラスチック収縮ひびわれは、発生しやすい傾向があるが、打込み直後に適切な養生を行うことによって防止することができる。
- (3) AE剤により、空気量が1%増加するのに伴って、圧縮強度は約3 ~4%低下する。一方、径の大きいエントラプトエアを巻込むと、圧縮強度の低下割合はエントレインドエアに比較して大きくなり、約6 ~7%低下する。
- (4) 初期養生温度が1 °C高くなると、圧縮強度が 7~8kgf/cm² 程度低下する。したがって、特に夏期施工するコンクリートでは、打込み温度や養生温度に関して、充分留意する必要がある。
- (5) 耐凍害性に関しては、non-AEコンクリートでも問題がないとも考えられるが、初期養生温度、養生方法、部材が暴露される環境等によっては、2 ~3%程度以上のAEコンクリートにする必要があると考えられる。

参考文献

1. 橋 大介、他：高強度コンクリートの物性に及ぼす各種要因の影響、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、1988、pp 203~208
2. 神田 衛、他：夏期におけるコンクリート強度の低下現象に関する一考察、コンクリート・ジャーナル、Vol. 8、No. 11、1970、pp 12~19
3. 服部 健一、他：高性能減水剤を使用した高強度コンクリートの耐凍害性、セメント技術年報、34、1980、pp 329~332
4. 小林 正几、他：高強度コンクリートの凍結融解に対する抵抗性について、セメント技術年報、28、1974、pp 295~297
5. 長瀬 重義、他：オートクレーブ養生した高強度コンクリートの耐凍害性、コンクリート工学年次講演会論文集、第4回、1982、pp 45~48