

# 低炭素型高強度コンクリートの研究

小林利充 一瀬賢一  
溝渕麻子

## Study on Low-Carbon-Type High-Strength Concrete

Toshimitsu Kobayashi Kenichi Ichise  
Asako Mizobuchi

### Abstract

To develop a low-carbon-type of high-strength concrete (Clean-crete), the fresh properties, strength, shrinkage, and durability were experimentally examined at a cement mixing ratio of 30%. As a result, Clean-crete was confirmed to attain a compressive strength (28-day standard cure) of more than 130 N/mm<sup>2</sup> through the design of an appropriate water-binder ratio, even when the proportion of the admixture in the binding material was set as high as 70%. A high admixture ratio induced neutralization. However, it was also confirmed that the neutralization progress could be restrained by making high-strength concrete.

### 概要

本研究は、混和材を高含有した低炭素型のコンクリート（クリーンクリート<sup>®</sup>）の高強度化を目的として、結合材に対するセメントの混合割合を30%とした条件のもと、調合条件（水結合材比および結合材の混合割合）および材料条件（結合材の種類）を要因として、フレッシュ性状、強度性状、収縮性状および耐久性に関する基礎的性状について実験的に検討した。その結果、結合材中の混和材の混合割合を70%と高含有にした場合でも、所定の水結合材比を設定することで、材齢28日標準養生強度で130N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度が得られることが確認できた。また、混和材を高含有した場合に課題となる中性化についても、高強度化することでその進行を抑制できることを促進中性化試験により確認できた。

## 1. はじめに

近年、環境問題への意識が高まり、コンクリート分野においても、環境負荷を低減した取組みが積極的に行われている。なかでも、コンクリートの低炭素化や副産物の有効利用を目的に、セメントの一部を高炉スラグ微粉末などの副産物を混和材として置換する研究が行われており<sup>1)</sup>、筆者らも結合材に対する混和材の混合割合を70%以上の高い含有率としたコンクリートに関して、各種検討を行い、低炭素型のコンクリート「クリーンクリート」の開発を行っている<sup>2)</sup>。ここで、クリーンクリートを含め混和材を高含有したコンクリートは、結合材にセメントのみを使用したコンクリートに比べて、材料を起源とするコンクリートの低炭素化は可能になるものの、水酸化カルシウム量が不足するため、中性化の進行が速いことに留意する必要がある。これに対して、結合材に対するセメントの混合割合が少なくても、高強度化して組織を緻密にすることは前述した中性化の進行抑制に対して有効な手段となり、また、クリーンクリートの適用範囲の拡大になるものと考えられる。しかしながら、混和材を高含有したコンクリートの高強度化に関して検討した事例は少なく、構造物への適用を考える上で、基礎的なデータを蓄積する必要がある。なお、本論での高強度化

とは、材齢28日標準養生強度で50N/mm<sup>2</sup>以上の領域とした。

本論文では、クリーンクリートの高強度化を目的に、調合条件（水結合材比および結合材の混合割合）および材料条件（結合材の種類）を要因に、フレッシュ性状、温度性状および強度性状を検討するとともに、一部の調合において収縮性状、中性化および凍結融解抵抗性について実験的に検討を行っている。

## 2. クリーンクリートの概要

クリーンクリートは、大林組が開発した低炭素型のコンクリートとして、二酸化炭素排出量原単位の大きいセメントを、副産物である高炉スラグ微粉末などの混和材に、大量に置換することで、コンクリートの低炭素化を実現している。具体的には、一般のコンクリートは、結合材をポルトランドセメントで構成している（少量混合成分は除く）。一方、クリーンクリートは、結合材に対するポルトランドセメントの混合割合を30%以下とし、70%以上を副産物である混和材で構成している。したがって、材料を起源とするコンクリートの二酸化炭素排出量を60～80%低減することが可能になる。また、副産物の有効利用になるという観点からも環境に配慮したコン

クリートである。さらに、コンクリートの品質として、セメントの使用量が少ないため、水和熱の抑制にもつながるという利点を有している。クリーンクリートの材料構成のイメージをFig. 1に示す。

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用材料

コンクリートの使用材料をTable 1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(C)を使用し、副産物には汎用的に流通可能な高炉スラグ微粉末(BS)およびシリコン起源のシリカフェーム(SF)を混和材として使用した。また、細骨材(S)および粗骨材(G)は茨城県桜川産硬質砂岩砕砂および砕石を、化学混和剤は、調合により高性能減水剤(SP1)または高性能AE減水剤(SP2)を選定して使用した。なお、使用材料はすべてJISに規定されるものとした。

#### 3.2 調合計画

コンクリートの設定条件をTable 2に、調合計画をTable 3に示す。スランプフロー(SLF)およびスランプ(SL)は、施工性を考慮して水結合材比ごとに設定した。調合計画としては、広範囲な強度性状を把握することを目的に、水結合材比(W/B)を15~44%とし、粗骨材かさ容積は水結合材比44%以外は0.54m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>に一定とした(水結合材比44% : 0.58m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)。単位水量(W)は、流動性を考慮した上で、原則として、水結合材比25%以下を150kg/m<sup>3</sup>、水結合材比30%以上を165kg/m<sup>3</sup>に設定した。次に、結合材の混合割合としては、混和材の高含有と強度発現性を考慮してセメントは30%一定とし、それ以外を高炉スラグ微粉末およびシリカフェームで構成し、それぞれの混合割合に着目して検討を行った。

#### 3.3 実験方法

コンクリートは、恒温恒湿室(20℃, 60%RH)内において、強制練りミキサ(最大容量60リットル)を用いて練混ぜを行い、所定のフレッシュ性状であることを確認し、供試体を作製した。その後、所定の材齢まで養生し、各種試験に供した。



Fig. 1 材料構成のイメージ  
Image of Material Composition

Table 1 使用材料  
Materials

分類		種類	
結合材(B)	セメント	普通ポルトランドセメント(C)	(3.16g/cm <sup>3</sup> )
	混和材	①高炉スラグ微粉末(BS)	(2.89g/cm <sup>3</sup> )
		②シリカフェーム(SF)	(2.20g/cm <sup>3</sup> )
		比表面積 : BS4300cm <sup>2</sup> /g, SF223,000cm <sup>2</sup> /g	
水(W)		上水道水(東京都清瀬市)	
細骨材(S)		茨城県桜川産硬質砂岩砕砂 (2.64g/cm <sup>3</sup> )	
粗骨材(G)		茨城県桜川産硬質砂岩砕石 (2.64g/cm <sup>3</sup> )	
混和剤(Ad)		①高性能減水剤(SP1)(No.1-16)	
		②高性能 AE 減水剤(SP2)(No.17-23)	

Table 2 設定条件  
Setting Conditions

項目	設定条件
スランプフロー(SLF) スランプ(SL)	W/B25%以下 : 65±10cm (SLF)
	W/B30% : 60±10cm (SLF)
	W/B37% : 55±10cm (SLF)
	W/B44% : 21±2cm (SL)
空気量(Air)	2%以下(No.1-19)
	3±1.5%(No.20-23)

Table 3 調合計画  
Mix Proportions of Concretes

No.	W/B (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	結合材の混合割合 (%)		
			C	BS	SF
1	15	150	30	65	5
2		150	30	60	10
3		150	30	55	15
4		150	30	50	20
5	18	150	30	70	0
6		150	30	65	5
7		150	30	60	10
8		150	30	55	15
9	21	150	30	70	0
10		150	30	65	5
11		150	30	60	10
12		150	30	55	15
13	25	150	30	70	0
14		150	30	65	5
15		150	30	60	10
16		150	30	55	15
17	30	150	30	70	0
18		150	30	65	5
19		150	30	60	10
20		165	30	70	0
21	30	165	30	70	0
22	37	165	30	70	0
23	44	165	30	70	0

### 3.4 試験項目

試験項目をTable 4に示す。試験項目としては、フレッシュ性状、温度性状、強度性状、収縮性状および耐久性について実施した。自己収縮試験は、日本コンクリート工学会の「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」<sup>3)</sup>に準じて行った。また、簡易断熱養生槽は、発砲スチロール製の断熱材で成形し、供試体と外気の間は、いずれの方向も20cmの断熱材を設置した。

Table 4 試験項目

Test Item		
項目		試験方法
フレッシュ性状	スランブフロー(SLF)	JIS A 1150
	スランブ(SL)	JIS A 1101
	空気量(Air)	JIS A 1128
	コンクリート温度(CT)	JIS A 1156
温度性状	簡易断熱養生温度(中心・外気温)	熱電対
強度性状	標準養生強度	JIS A 1108
	簡易断熱養生強度	JIS A 1108
収縮性状	乾燥収縮	JIS A 1129
	自己収縮	JCI高流動 <sup>3)</sup>
耐久性	中性化抵抗性	JIS A 1153
	凍結融解抵抗性	JIS A 1148

## 4. 実験結果

### 4.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状としては、概ね所定の設定条件を満たすことができた。ここで、水結合材比と高性能減水剤の添加率の関係をFig. 2に、粘性の評価として水結合材比と50cmフロー到達時間の関係をFig. 3に示す。高性能減水剤の添加率の影響として、水結合材比が15~25%の領域について述べると、水結合材比が小さいほど、SFの混合割合が大きいくほど高性能減水剤の添加率が多くなり、水結合材比やSFの混合割合による調合条件で添加率が大きく異なる傾向が見られた (Fig. 2)。一方、粘性の評価を50cmフロー到達時間で見ると、水結合材比15.0および18%の50cmフロー到達時間はSFの混合割合によって異なるが、概ね14~18秒程度である。水結合材比21%では10~14秒程度であり、水結合材比25%では7~12秒程度であった。この結果から、水結合材比の増加に伴って50cmフロー到達時間は速くなり、粘性が低減される傾向にある (Fig. 3)。なお、SFの混合割合が粘性に及ぼす影響については、今回の実験からは明確な差異が確認できなかった。

### 4.2 温度性状

簡易断熱養生による温度性状をTable 5に示す。水結合材比15%を除けば、水結合材比の減少に伴って最高温度および温度上昇量は増大する傾向にある。また、同一の水結合材比でも、No.21はNo.19に比べて最高温度で5.2℃、温度上昇量で5.0℃大きくなっている。これは、同一の水結合材比でもセメントおよび高炉スラグ微粉末の単位量が多いことに起因して反応が促進され、No.21の温度が高くなったものと推察される。

### 4.3 強度性状

結合材水比(B/W)と28日標準養生強度の関係をFig. 4に、SFの混合割合と28日標準養生強度の関係をFig. 5に、結合材水比と91日簡易断熱養生強度の関係をFig. 6に示す。28日標準養生強度は、SFの混合割合にかかわらず、結合材水比の増加に伴って増大し、結合材水比6.67 (水結合材比15%) においては、130~140N/mm<sup>2</sup>に達する。ただし、結合材水比が大きい領域 (水結合材比が小さい領域) においては、強度発現性が緩慢になり、結合材水比が強度に及ぼす影響が低下する傾向が見られた (Fig. 4)。

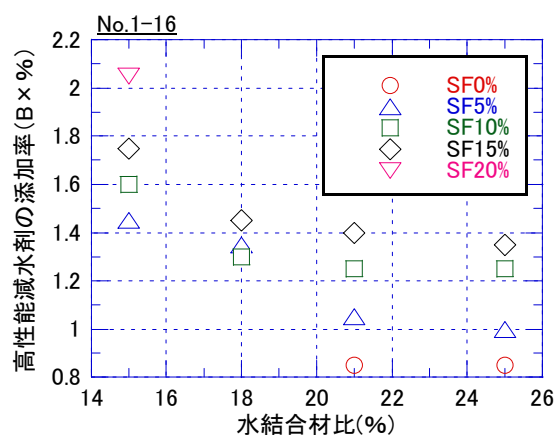


Fig. 2 W/Bと高性能減水剤の添加率の関係  
Relationship between Water-Binder Ratio and Superplasticizer Content

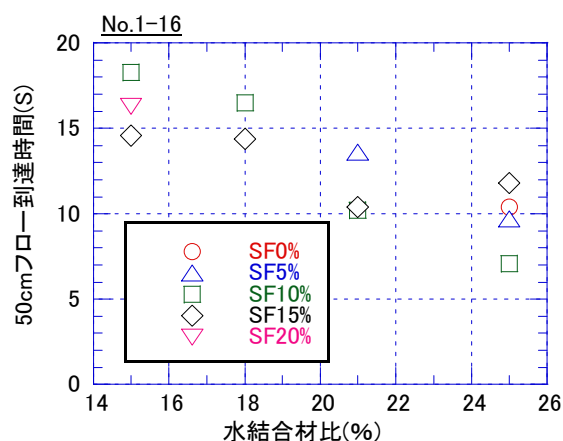


Fig. 3 W/Bと50cmフロー到達時間の関係  
Relationship between Water-Binder Ratio and 50cm Flow Time

また、SFの影響として、水結合材比15、25および30%では、SFの混合割合が10%で最大値を示すが、水結合材比18および21%ではSFの混合割合が10%で最小値を示し、明確な傾向は不明である (Fig. 5)。次に、3成分系(C+BS+SF)と2成分系(C+BS)について、91日簡易断熱養生強度を検討しているが、標準養生強度と同様に結合材水比の増加に伴って増大する傾向にあるが、結合材水比が大きい領域においては、強度発現性が緩慢になる傾向が見られた (Fig. 6)。

構造体強度補正值( $_{28}S_{91}$ ) (管理用供試体による標準養生強度と構造体コンクリート強度の差にもとづく補正值を言う) に関して、28日標準養生強度と91日簡易断熱養生強度の関係から構造体強度補正值を求め、91日簡易断熱養生強度との関係に整理した結果をFig. 7に示す。2成分系の $_{28}S_{91}$ は、簡易断熱養生強度の増加に伴って大きくなる傾向にあり、簡易断熱養生強度が90N/mm<sup>2</sup>程度の場合、 $_{28}S_{91}$ は11N/mm<sup>2</sup>程度であった。一方、3成分系の $_{28}S_{91}$ は非常に小さく、簡易断熱養生強度が90N/mm<sup>2</sup>以上でも $_{28}S_{91}$ は1N/mm<sup>2</sup>以下であった。また、簡易断熱養生強度レベルを同程度にした場合の2成分系と3成分系の $_{28}S_{91}$ を比べると (簡易断熱養生強度が90N/mm<sup>2</sup>で比較)、その差異 ( $_{28}S_{91}$ ) は10N/mm<sup>2</sup>程度になり、3成分系の $_{28}S_{91}$ の方が非常に小さい結果となった。

Table 5 温度性状  
Temperature Properties

項目	No.	W/B (%)	温度性状 (°C)		
			初期温度	最高温度	温度上昇量
C+BS+SF	2	15	20.7	50.7	30.0
	7	18	20.7	51.7	31.0
	11	21	20.3	50.2	29.9
	15	25	19.8	46.9	27.1
	19	30	20.2	44.2	24.0
C+BS	20	25	20.7	54.6	33.9
	21	30	20.4	49.4	29.0
	22	37	20.3	44.3	24.0
	23	44	20.0	40.8	20.8

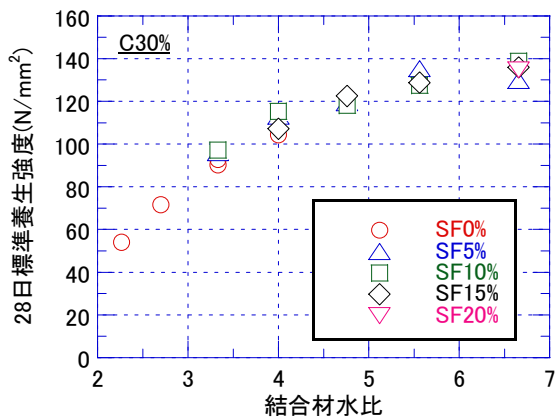


Fig. 4 B/Wと28日標準養生強度の関係  
Relationship between Binder-Water Ratio and Compressive Strength by 28-Day Standard Cure

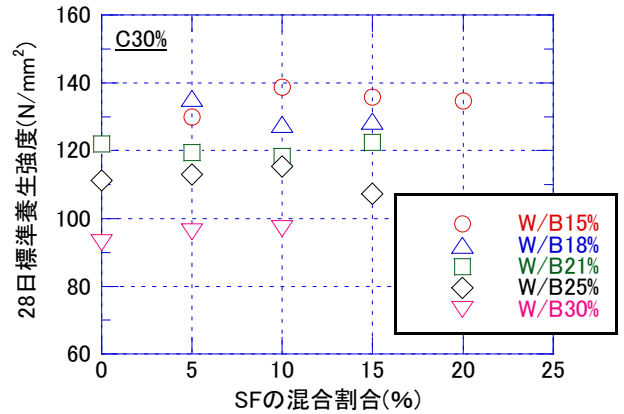


Fig. 5 SFの混合割合と28日標準養生強度の関係  
Relationship between Mixing Ratio of Silica Fume and Compressive Strength by 28-Day Standard Cure

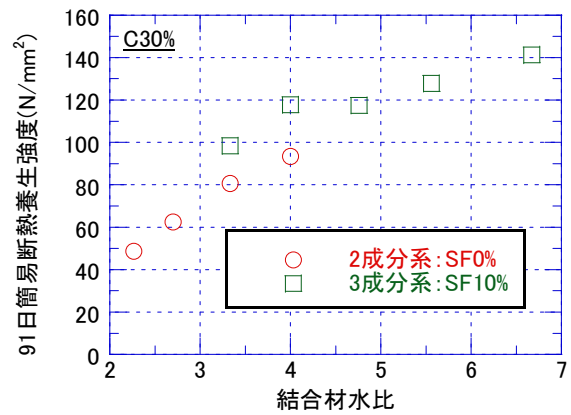


Fig. 6 B/Wと91日簡易断熱養生強度の関係  
Relationship between Binder-Water Ratio and Compressive Strength by 91-Day Simplified Insulator Cure

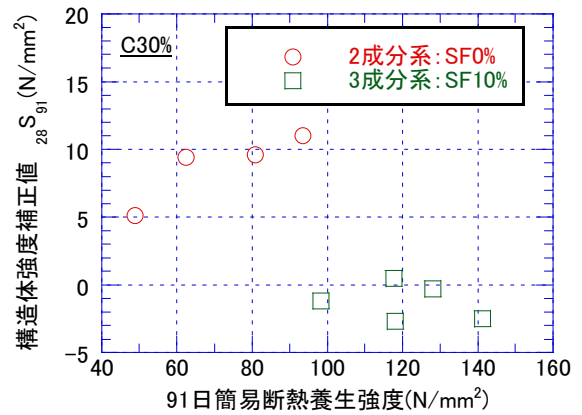


Fig. 7 91日簡易断熱養生強度と $_{28}S_{91}$ の関係  
Relationship between Compressive Strength by 91-Day Simplified Insulator Cure and  $_{28}S_{91}$

最高温度が $_{28}S_{91}$ に及ぼす影響をみると (Fig. 8), 2成分系は, 最高温度が高くなるにつれて $_{28}S_{91}$ は高くなる傾向にあるが, 3成分系では, 温度が $_{28}S_{91}$ に及ぼす明確な影響は見られなかった。したがって, SFの有無が20°Cの環境の標準養生強度に及ぼす影響はあまり見られないが, 温度が加わる簡易断熱養生強度では, SFの混入により強度が増進され,  $_{28}S_{91}$ が小さくなったものと推察される。

#### 4.4 収縮性状

収縮性状として, 乾燥収縮については, 長さ変化試験によりその性状を確認した。材齢と乾燥収縮率の関係を Fig. 9に示す。全体的な傾向として, 水結合材比の増加に伴って乾燥収縮率は増大する。材料構成にかかわらず, 材齢の経過に伴って乾燥収縮率は大きくなる傾向にあるが, 水結合材比が小さい場合はその傾向は小さく収束傾向にある。一方, 水結合材比が44%と大きい場合には, 材齢182日でも収束していない傾向が見られる。また, 水結合材比30%において, 材料構成が乾燥収縮率に及ぼす影響を見ると, SFの混合割合が5%で最も小さくなる。さらに, 水結合材比30%で単位水量が乾燥収縮率に及ぼす影響を見ると, 本実験の限りでは顕著な差異は見られない。なお, いずれの調合においても, 材齢182日における乾燥収縮率は $550 \times 10^{-6}$ 以下と小さい結果であった。

材齢と自己収縮ひずみの関係を Fig. 10に示す。なお, 自己収縮ひずみの測定起点は凝結時間の始発時とした。全体的な傾向としては, 材齢に伴って自己収縮ひずみは大きくなる傾向にあるが, 前述した乾燥収縮率と比べると, いずれの調合においても材齢182日ではほぼ収束する傾向がみられる。また, 自己収縮ひずみは, 水結合材比の減少に伴って増大する傾向にある, これは, 組織が緻密化されることで, 水分の移動が起こりにくくなり, 硬化体内部が自己乾燥状態となり, 自己収縮が大きくなったものと推察される。なお, 水結合材比18%で材齢182日の自己収縮ひずみは, 約 $700 \times 10^{-6}$ であった。同一の水結合材比で構成材料の影響 (SFの有無) を見ると, その差は $15 \times 10^{-6}$ であり, ほとんど変わらない結果であった。

#### 4.5 中性化抵抗性

中性化抵抗性については, 28日標準養生強度の逆数と中性化の進行を表現する中性化速度係数に整理した結果を Fig. 11に示す。限られたデータではあるが, 中性化速度係数と強度は高い相関性が見られ, 高強度化され組織が緻密になることにより, 中性化の進行は抑制できるものと考えられる。また, 中性化速度係数の絶対値として, 水結合材比の最大値が44%でも, 中性化速度係数は $3.5 \text{ mm}/\sqrt{\text{週}}$ であり, 計画供用期間を65年 (標準) とした場合の中性化深さは, 屋内で28.8mm, 屋外で15.8mmとなり, 混和材を70%と高い含有率にした場合においても, 中性化深さは30mm以下となる。なお, 中性化深さは, 日本建築学会の高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説の式 ( $C = A \sqrt{(CO_2/5)} \times \sqrt{t}$  C: 中性化深

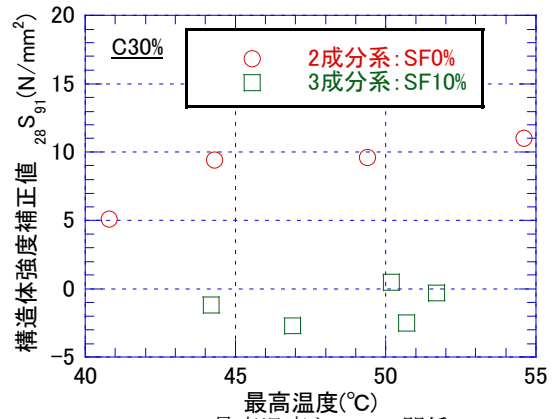


Fig. 8 最高温度と $_{28}S_{91}$ の関係

Relationship between Maximum Temperature of Concrete and  $_{28}S_{91}$

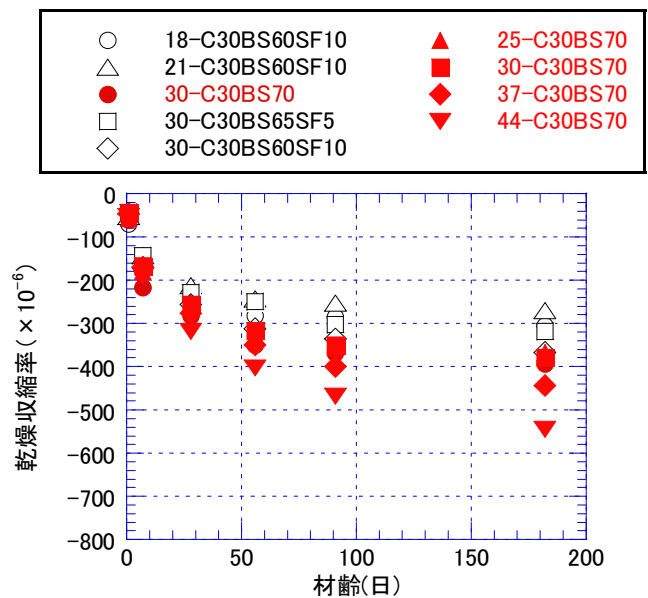


Fig. 9 材齢と乾燥収縮率の関係

Relationship between Curing Period and Dry Shrinkage

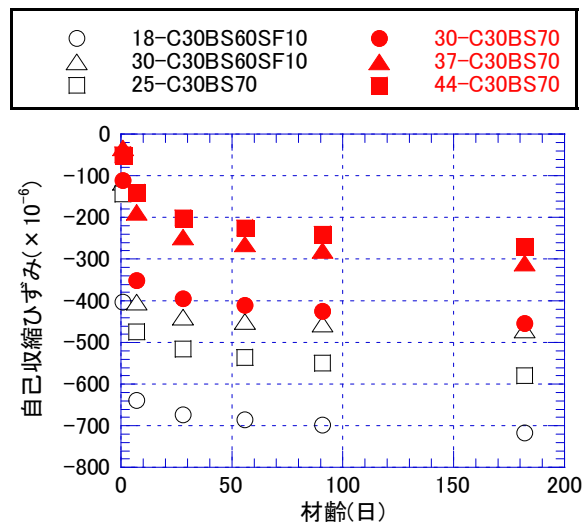


Fig. 10 材齢と自己収縮ひずみの関係

Relationship between Curing Period and Self-Shrinkage Strain

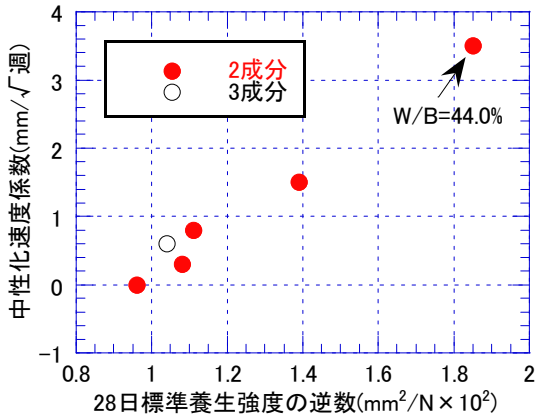


Fig. 11 28日標準養生強度の逆数と中性化速度係数の関係

Relationship between Reciprocal of Compressive Strength by 28-Day Standard Cure and Rate of Neutralization Coefficient

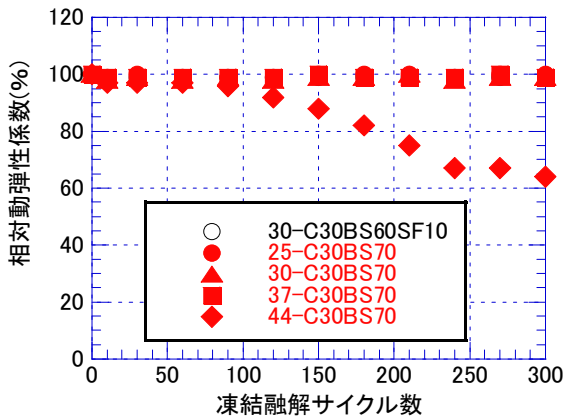


Fig. 12 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係  
Result of Freezing and Thawing Test

さ(mm), A : 中性化速度係数(mm/√週), CO<sub>2</sub> : 炭酸ガス濃度(%), t : 材齢(週) )により算出した。従来, 混和材を高含有したコンクリートは, 水酸化カルシウム量の不足により, 中性化の進行が速いとされていた。しかしながら, 高強度化により, 組織が緻密になることで二酸化炭素の浸入を低減でき, 中性化の課題が解決され, 構造体への適用が広がるものと考える。

#### 4.6 凍結融解抵抗性

Fig. 12には, 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。300サイクル後の相対動弾性係数(耐久性指数)は, 水結合材比44%未満の調査は90%以上を有している。ここで, JASS 5<sup>4)</sup>の「凍結融解作用を受けるコンクリート」では, 著しい凍結融解作用を受けても明確な劣化が生じない値として85%が規定されており, その規定を十分に満足できる。一方, 水結合材比44%の耐久性指数は64%であり, 計画供用期間が短期であれば対凍害性を有することができると考える。したがって, 適用する用途を考慮すれば使用に耐え得るものと考える。

## 5. まとめ

本論文の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 標準養生強度および簡易断熱養生強度は, シリカフェームの混合割合にかかわらず, 結合材水比の増加に伴って増大する傾向にあり, 130N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度が得られる。ただし, 結合材水比が大きい領域(水結合材比が小さい領域)においては, 強度発現が緩慢になり, 結合材水比が強度に及ぼす影響が低下する傾向が見られる。
- 2) 2成分系(C+BS)の構造体強度補正值 (<sub>28</sub>S<sub>91</sub>) は, 簡易断熱養生強度の増加に伴って大きくなる傾向にあり, 簡易断熱養生強度が90N/mm<sup>2</sup>程度の場合, <sub>28</sub>S<sub>91</sub>は11N/mm<sup>2</sup>程度であった。一方, 3成分系(C+BS+SF)の<sub>28</sub>S<sub>91</sub>は非常に小さく, 簡易断熱養生強度が90N/mm<sup>2</sup>以上でも<sub>28</sub>S<sub>91</sub>は1N/mm<sup>2</sup>以下であり, シリカフェームの影響により<sub>28</sub>S<sub>91</sub>が小さくなったものと推察される。
- 3) 収縮特定として, 乾燥収縮率は水結合材比の増加に伴って増大する傾向にあるが, 自己収縮は逆に水結合材比の増加に伴って減少する傾向がある。
- 4) 中性化抵抗性として, 中性化速度係数と強度は高い相関性が見られ, また, 中性化速度係数の絶対値としては, 水結合材比の最大値が44%でも, 中性化速度係数は3.5mm/√週であり, 高強度化することで中性化の進行を抑制できると考える。
- 5) 凍結融解抵抗性は, 高強度化することで300サイクル後の耐久性指数で90%が得られた。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり, ご協力頂きました日本シカの関係諸氏に紙面を借りて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会 : 混和材を積極的に使用するシンポジウム, 184p, 2011.12
- 2) 小林利充, 他 : 混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状 (その1~その12), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.185-190, pp.865-874, pp.214-220, pp.325-328, 2011-2014
- 3) 日本コンクリート工学協会 : 超流動コンクリート研究委員会報告書 (II), pp.209-210, 1994.5
- 4) 日本建築学会 : 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 (鉄筋コンクリート工事), pp.612-624, 2009.2