

論文

[1041] シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの長期性状

牧野 真之^{*1}・岸谷 孝一^{*2}・江口 清^{*3}・岸本 均^{*4}

1.はじめに

一般にシリカフェームをコンクリート中に適切に用いると作業性の改善および強度の増進等の効果があるといわれ[1]、近年、シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの研究が活発に行われ、フレッシュコンクリートの性状および力学的性状等について、数多くの報告がなされている。しかし、シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの耐久性に関する研究は未だ十分とはいえず、その混和効果も明確でなく、また、その評価にもばらつきがあるのが現状である[2]。

そこで筆者らは、それらをより明確にすることを目的とし、シリカフェームを用いた超高強度コンクリートの実用化を目指した研究の一環として、耐久性について検討した。

2.実験概要

シリカフェーム（以下CSFと略記）を用いた超高強度コンクリートの圧縮強度および耐久性についての基礎的データを収集することを目的として、CSF混和率、空気量に着目し、種々の実験を行った。なお、本研究は耐久性に関する課題のうち、乾燥収縮、中性化および凍結融解抵抗性について行った。

2.1 実験に供したコンクリート

(1) 要因と水準

実験に供したコンクリートの要因と水

準を表-1に示す。設計基準強度1,000kgf/cm²となるように水結合材比を25%とし、CSF混和率は結合材の内割りで0~10%の3水準とした。また、空気量は、JASS5ではその目標値を4~5%、RC示方書ではAEコンクリートについて4~7%とそれぞれ明示しているが、CSFを用いた超高強度コンクリートは空気量調整剤を用いず、目標空気量を2%程度以下としている研究が多くみられる。このような実績を考慮し、表中に示す3水準とした。なお、比較用として水結合材比55%の普通コンクリートについても実験を行った。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準	
水結合材比(%)	25	55
CSF混和率(%)	0, 5, 10	0
空気量(%)	0~2, 2~3, 3~5	4

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (比重: 3.16)
細骨材	大井川産川砂 (比重: 2.60)
粗骨材	秩父産碎石 (硬質砂岩, 最大寸法20mm, 比重: 2.71)
混和材	シリカフェーム (粉末状, 比重: 2.20)
混和剤	高性能AE減水剤 (アミノスルホン酸系)

表-3 シリカフェームの物性

化学的性質	付着水分(%)	0.6
	強熱減量(%)	1.6
	SiO ₂ 含有量(%)	95.1
物理的性質	比表面積(m ² /g)	20.2
	単位容積質量(kg/m ³)	310

*1 前田建設工業(株)技術研究所建築材料施工研究室(正会員)

*2 日本大学教授 理工学部建築学科、工博(正会員)

*3 前田建設工業(株)技術研究所次長(正会員)

*4 前田建設工業(株)技術研究所建築材料施工研究室主任(正会員)

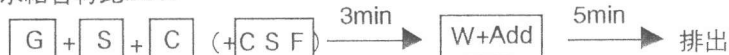
表-4 調合表

調合名	スランプ フロー (cm)	水結合 材比 (%)	細骨 材率 (%)	C S F 混和率 (%)	空 気 量 (%)	単位水 量 (kg/m ³)	単位重量(kg/m ³)				高性能 A E減 水剤 (C×%)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
							セメ ント	細骨材	粗骨材	C S F				
W25S0	55	25	40	0	0~2	160	640	642	1004	0	1.60	59.8	1.0	24
W25S5				5			608	638	997	32	1.35	52.8	0.8	24
W25S10(0-2)				0~2	576		633	990	64	1.60	58.5	0.8	24	
W25S10(2-3)				2~3	576		628	982	64	1.50	50.3	2.4	23	
W25S10(3-5)				3~5	576		612	957	64	1.55	58.0	4.9	23	
W55S0	21*	55	48	0	4	180	327	844	953	0	1.20	21.2*	4.5	21

(2) 使用材料

C S Fはノルウェー製、粉末状のものを用いた。使用材料の一覧を表-2に、また、C S Fの諸物性を表-3に示す。

水結合材比:25%



水結合材比:55%



図-1 練り混ぜ方法

(3) 調合および性状

調合表およびフレッシュコンクリートの性状を表-4に示す。スランプおよびスランプフローは、高性能AE減水剤量で、空気量は空気調整剤量でそれぞれ調整を行った。コンクリートの製造は100/練り強制2軸式ミキサを用いて、図-1に示すような方法で行った。なお、空気量の安定化を図るため、本練り時間を5分間とした。

2.2 実験項目および方法

本実験の項目および実験方法を以下に示す。

圧縮強度試験：JIS A 1108に準じて行った。試験材齢を7、28、91日とし、所定の材齢まで標準養生を行った。

乾燥収縮試験：JIS A 1129に準じ、ダイヤルゲージ法にて行った。

中性化試験：「コンクリートの促進中性化試験方法（案）」（日本建築学会）に準じて行った。

凍結融解試験：ASTM C 666で規定するA法「水中における急速凍結融解試験方法」に準じて行った。供試体は脱型後標準養生を行い、材齢14日で試験を開始した。なお、凍結融解サイクル数は普通コンクリートが破断した750サイクルまで継続し、また、それ以前に相対動弾性係数が60%を下回った場合でも供試体が破断するまで試験を行い、試験体が破断するサイクル数を確認した。

3. 実験結果及び考察

3.1 圧縮強度

図-2に各調合における材齢と圧縮強度の関係を示す。図からも明らかなように水結合材比25%の超高強度コンクリートは材齢28日で1,000kgf/cm²を満足し、かつ、材齢28日以後で、C S F混和率の増加に伴い圧縮強度も増加する傾向が認められ、その割合は、C S F混和率5%の増加に

対し、圧縮強度は10%程度増加する結果となった。

図-3にCSF混和率10%とし、空気量を変えたものについて、その関係を示す。空気量の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向が認められ、材齢28日におけるその割合は空気量1%の増加に対し、圧縮強度は3.1%低下する結果となった。

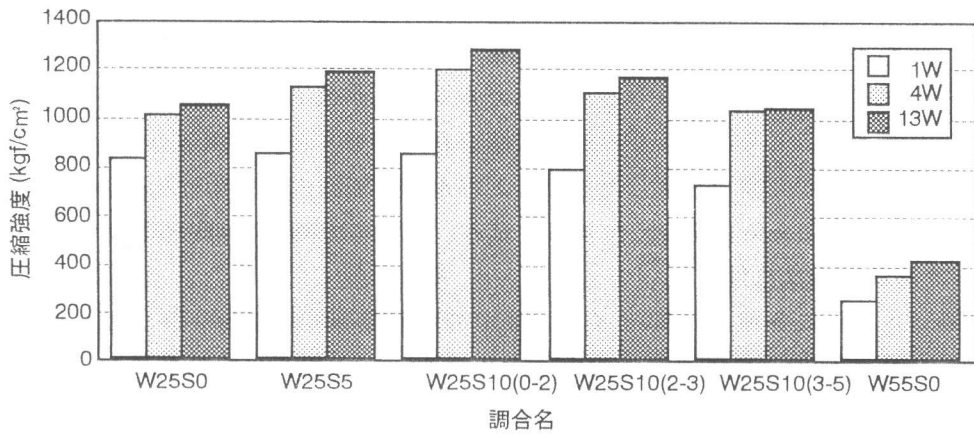


図-2 圧縮強度試験結果

3.2 乾燥収縮

図-4に試験開始から材齢26週までの各調合における乾燥収縮の関係を示す。図からも明らかなように、普通コンクリートは長期にわたり収縮している。それに対し超高強度コンクリートの収縮量は、試験開始後1週では普通コンクリートより大きいですが、それ以後の勾配は緩やかになり、材齢26週で400~500×10⁻⁴の範囲であった。また、各調合の超高強度コンクリート間で乾燥収縮量に有意差はなく、CSF混和率、空気量の影響は小さいことが確認できた。

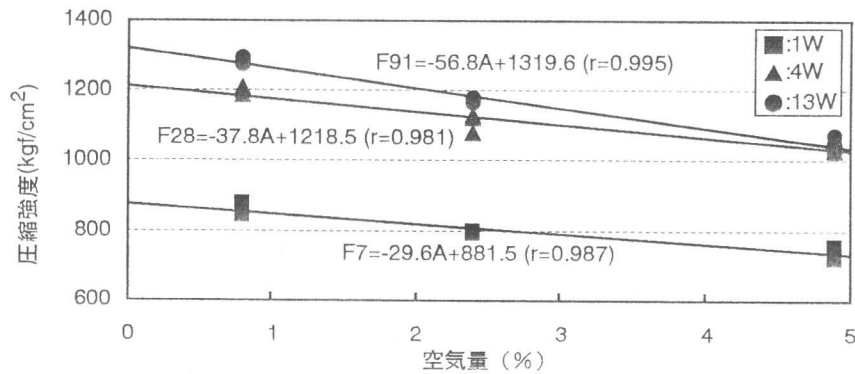


図-3 空気量と圧縮強度の関係

3.3 中性化深さ

図-5に試験開始から材齢26週までの中性化深さを示す。図からも明らかなように、超高強度コンクリートの中性化深さは各材齢においてほぼ等しく、かつ、材齢26週で、すべて1mm以下であった。

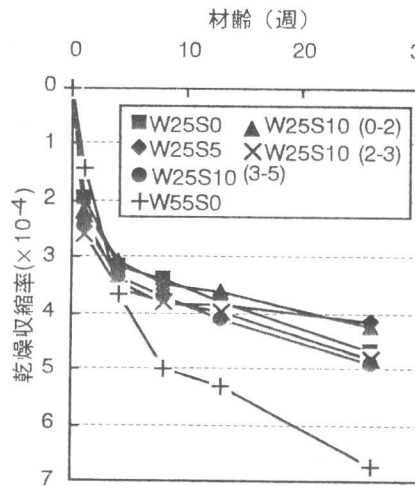


図-4 乾燥収縮試験

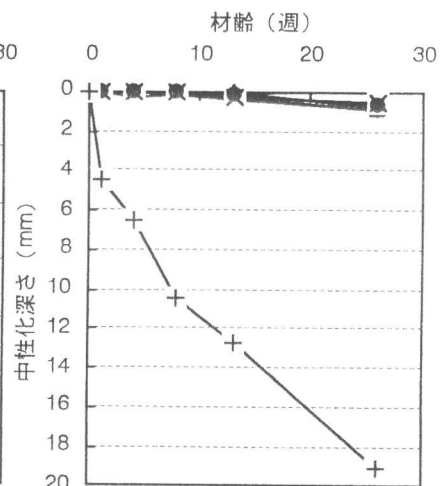


図-5 促進中性化試験結果

超高強度コンクリートは水結合材比が小さいこと、および超微粒子であるCSFをコンクリートに混和すること等により組織が緻密化され中性化が抑制されると考えられる。一方、CSFは初期のポゾラン反応性が高く、水酸化カルシウムが低下し、中性化が進行しやすくなるといった懸念もある。これら相反した性質は水結合材比、CSF混和率等の調合条件によって異なると考えられるが、本実験で設定した要因および水準の範囲内では中性化深さに有意差は認められなかった。今後、調合条件を変えた実験を試み、これらの機構を明らかにする必要がある。

3.4 凍結融解抵抗性

図-6, 7に各調合の750サイクルまでの相対動弾性係数および質量減少率をそれぞれ示す。また、図-6中に試験サイクルを300サイクルとした場合の耐久性指数(DF%)、および空気量を示す。

コンクリート供試体は凍結融解サイクル数の増加に伴い、①スケーリングを起こし徐々に相対

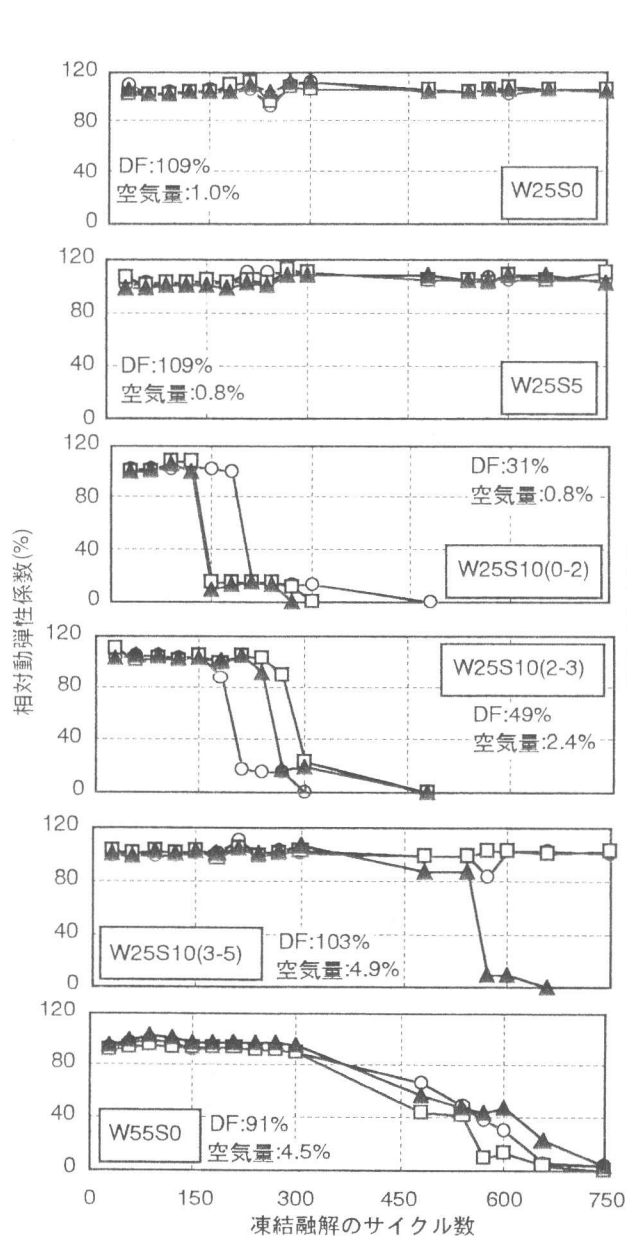


図-6 相対動弾性係数

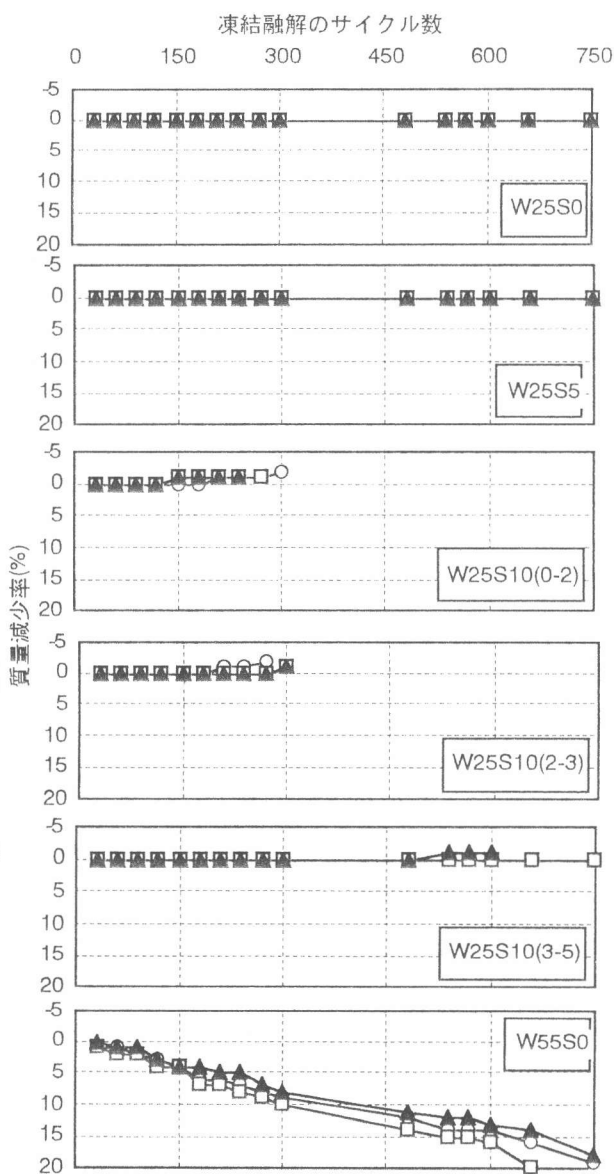


図-7 質量減少率

動弾性係数が低下し、最終的に破断する、②表面に比較的幅が大きいひび割れを生じ、ひび割れ発生から比較的lowサイクルで急激に劣化し破断する[3]、③健全な状態を保つ、と大きく3種類に分けられる。普通コンクリートは上記①にあてはまり、300サイクルを越えると相対動弾性係数の低下が顕著に表れ、750サイクルで破断した(写-1)。また、超高強度コンクリートのうち、CSF無混和、および5%混和したものは③に該当し、空気量が1%以下であっても750サイクル終了時まで健全な状態を保った。それに対し、CSFを10%混和したものは②に該当し、空気量が0.8および2.4%では全数②の大きいひび割れの発生(写-2、3)に続いて破断し(写-4)、また、4.9%のものでは3本中1本が同様な挙動を示した。

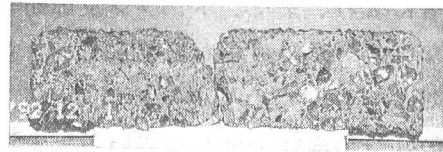
図-6において相対動弾性係数が急激に低下するところに着目し、図-7と比較すると約2%程度重量が増加していることが確認できる。これは、組織の膨張およびその部分への吸水を示しているものと思われる。

空気量を一定とし、CSF混和率を変えて比較すると、上記の通りCSF無混和および5%混和した超高強度コンクリートは750サイクル終了時まで健全な状態を保ったが、CSF混和率10%のそれは、早いものでは150サイクルで相対動弾性係数が急激に低下し、480サイクルで全数破断した。

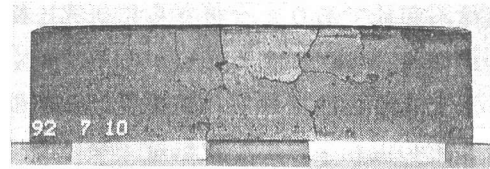
JASS5「高耐久性コンクリート」では耐久性指数の品質目標値を300サイクルで80%以上と定めている。本実験でのCSFを用いた超高強度コンクリートのうちCSFを5%混和したものおよびCSFを10%混和し空気量が4.9%のものの耐久性指数はそれぞれ109%、103%とこれを満足した。

また、本実験はASTM C 666に準じ、10×10×40cmの供試体を用い、2週間水中養生を行った後に実施したが、「相対動弾性係数は供試体の寸法によって異なる」[4]、「練り上がり温度を含む初期の養生条件が耐凍害性に影響を及ぼす」[3]という報告もある。実構造物の耐凍害性を評価する場合、事前に実工事の条件を踏まえた試験についても実施し、併せて検討することが望ましいと思われる。

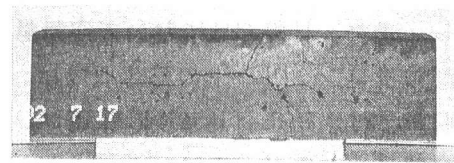
一般的にはCSFの混和によってC-S-H構造が密になること、ペーストと骨材との結合が強固になること、空隙構造が改善されることなどを指摘して凍結融解抵抗性が向上すると結論づけている報告が多いが、中には、「CSFの混和量により抵抗性が劣る可能性がある」[5]、または、「CSFの効果はあるものの、空気量の効果が最も大きい」[6]という報告もある。今回の実験結果からは①CSFの混和率が5%以下であれば、空気量によらず凍結融解抵抗性は優れてい



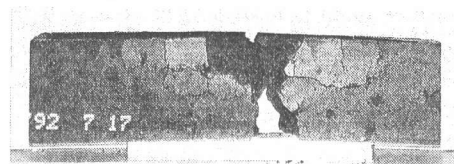
写-1 普通コンクリート
調合名:W55S0,
750サイクル,破断



写-2 超高強度コンクリート
調合名:W25S10(0-2),
270サイクル,相対動弾性係数:11%



写-3 超高強度コンクリート
調合名:W25S10(0-2),
300サイクル,相対動弾性係数:12%



写-4 超高強度コンクリート
調合名:W25S10(0-2),
300サイクル,破断

る。② C S F を 10% 以上混和する場合、十分な空気量を確保しないと凍結融解抵抗性は劣る。等の結果が得られた。この理由として、「C S F を多量に混和した場合、マイクロフィラー効果が顕著に表れ、また、ポゾラン反応が早期に発現し組織が緻密化される。その結果、空気量が十分でない場合水の移動が妨げられ、より大きい静水圧が供試体内部の自由空隙間を組織している壁に対して働くため」と指摘している文献[1] もある。上記の他、C S F の混和がコンクリート中の水分の凍結を助長しているとも考えられ、具体的には、C S F を多量に混和することにより微細なひび割れが生じ、水分の凍結が起こりやすくなる、あるいは、C S F 自体が過冷却水の凍結を促す性質を含んでいる、等が挙げられる。しかし、これらは今回の実験結果より断定することは不可能であり、今後さらに研究・検討を行い、C S F を用いた超高強度コンクリートの凍結の機構を明らかにする必要がある。

以上より、凍結融解作用を受ける部位に C S F を混和した超高強度コンクリートを使用する場合、その混和率および空気量について相互作用を充分考慮し、設定することが必要と思われる。

4.まとめ

本実験より得られた知見を以下に示す。

- ① 超高強度コンクリートの圧縮強度は材齢28日以後で C S F 混和率5%の増加に対し、10%程度増加し、また、材齢28日において空気量1%の増加に対しては、3%程度低下する。
- ② 超高強度コンクリートの乾燥収縮は、C S F 混和率および空気量の影響を受けにくく、かつ、その収縮量は水結合材比55%の普通コンクリートに比べて小さい。
- ③ 超高強度コンクリートは、水結合材比が低いため組織が緻密になり、中性化の進行は極めて遅く、かつ、C S F の有無による差はない。
- ④ C S F を混和した超高強度コンクリートの凍結融解による劣化性状は通常のそれとは異なる。
- ⑤ C S F を混和した超高強度コンクリートの凍結融解抵抗性は、空気量が4.9%以上であれば300サイクルで健全な状態を保ち、JASS 5「高耐久性コンクリート」の品質目標値を満足する。

参考文献

- [1] 田中健治郎、シリカフェームを用いたコンクリートの耐久性、「シリカフェームを用いたコンクリート」に関するシンポジウム講演論文報告集、土木学会、pp.103-108、1993.11
- [2] 海洋開発専門委員会「シリカフェームを用いたコンクリートに関する調査報告」、(社)セメント協会、pp.53-55、1866.3
- [3] 鎌田英治、高強度・超高強度コンクリートの気泡組織と凍結融解抵抗性に関する実験、高強度コンクリート分科会報告書、(財)国土開発技術研究センター、4-13-1-8、1991.3
- [4] 洪悦郎、長谷川寿夫、コンクリートの凍結融解試験方法の動向、コンクリート工学、VOL.19、No.9、pp.16-22、1981
- [5] CARETTE G.G., MALHOTRA V.M, Mechanical properties, durability and drying shrinkage of portland cement concrete incorporating silica fume, CEMENT CONCRETE AND AGGREGATES, Vol.5, No1, pp.3-13
- [6] VIRTANEN J., Freeze-thaw resistance of concrete containing blast-furnace slag, flyash or condensed silica fume, ACI SP-79, pp.923-942, 1983