

論文 高ビーライトセメントとシリカフュームを用いた高強度 コンクリートの基礎的性質に関する研究

一瀬賢一*¹・澁田安浩*²・川口 徹*³

要旨：本研究は、設計基準強度60~120N/mm²のコンクリートを対象とし、高ビーライトセメントおよびシリカフュームを用いた高強度コンクリートの基本的な物性把握を目的として実験を行った。フレッシュ時の性質、硬化後の各種力学特性（圧縮強度、引張強度、曲げ強度）、乾燥収縮特性、中性化促進試験および凍結融解抵抗性試験等の結果について検討・考察する。その結果、凝結は若干遅れるが、施工性は良く、強度も最高140N/mm²の高強度コンクリートを確保できた。また、耐久性にも優れていることが分かった。

キーワード：高強度、高ビーライトセメント、シリカフューム、基礎的性質、耐久性

1. はじめに

近年RC超高層建物を中心として設計基準強度60N/mm²を超える高強度コンクリートが使用されている。この強度レベルのコンクリートになると結合材として普通ポルトランドセメントのみでは施工性および強度の確保が困難となる。特に夏季においては強度発現の停滞や温度ひび割れの発生などマスコンクリート同様の問題が生じてくる。このため施工性改善、強度発現の改善およびコンクリート打設後の温度上昇量の低減を図るには、高ビーライトセメントの使用、シリカフュームや高炉スラグ微粉末などの混和材の使用、高性能AE減水剤の最適使用等を検討する必要がある。

本研究は、設計基準強度60~120N/mm²のコンクリートを対象とし、高ビーライトセメントおよびシリカフュームを用いた高強度(W/C=20~30%)・高流動(スランプフロー値60cm)コンクリートの基本的物性の把握を目的として実験を行った。フレッシュ時の性質、硬化後の各種力学特性（圧縮強度、引張強度、曲げ強度）、乾燥収縮特性、中性化促進試験および凍結融解抵抗性試験結果について検討・考察する。

2. 実験の概要

実験の組合せを表-1に示す。実験要因は、セメント3種類(高ビーライトセメント2種類、普通セメント1種類)、水結合材比(W/B=30,25,20%)3種類、シリカフューム(SF)混入の有無2種類であり、計13種類のコンクリートについて検討した。使用した各セメント、骨材の品質を表-2,3に示す。ここで使用した高ビーライトセメントは、材齢28日強度で普通セメントと同程度の強度発現を期待できる2銘柄(LA, LB)とした。SFは、粉体状オーストラリア産($\rho=2.2$, 比表面積:約20m²/g, SiO₂:90%, SO₃:0.1%以下, MgO:0.03%, 湿分:0.4%, 強熱減量:0.7%)をセメントの内割り10%混入した。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した。主なコンクリート調合を表-4に示す。調合は、各水結合材比ごとに単位水量、細骨材率を一定として定めた。目標スランプフロー値は60±10cm, 目標空気量は2.0±1.0%とした。

測定項目および測定方法を表-5に示す。圧縮強度、引張強度供試体には、10φ×20cm供試体、曲げ強度、乾燥収縮ひずみ、中性化および凍結融解試験用供試体には、10×10×40cm

*1 (株)大林組技術研究所 建築第二研究室 副主任研究員 工修(正会員)

*2 同研究員 工修(正会員) *3 同室長 工修(正会員)

表-1 実験の組合せ

W/B (%)	SF (%)	低発熱(L)		普通(N)
		LA	LB	
30	0	LA30 ¹⁾²⁾	LB30	.....
	10	LA30SF ¹⁾²⁾
25	0	LA25 ¹⁾²⁾	LB25 ¹⁾	N25 ¹⁾²⁾
	10	LA25SF ¹⁾²⁾	LB25SF ¹⁾	N25SF ¹⁾²⁾
20	0	LA20 ¹⁾²⁾	LB20	.....
	10	LA20SF ¹⁾²⁾	N20SF

1) 凝結試験 2) 中性化・乾燥収縮・凍結融解

表-2 セメントの品質

種別	比重	比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成 (%)				圧縮強さ (N/mm ²)	
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	7日	28日
LA	3.20	4170	32	46	4	11	13.5	37.3
LB	3.20	3730	35	43	4	9	17.1	33.8
N	3.16	3290	58	17	9	9	26.9	42.9

表-3 骨材の品質

記号	骨材の種類	表乾比重	粗粒率	吸水率 (%)
S	木更津産山砂	2.60	2.45	2.10
G	青梅産砕石	2.65	6.92	0.74

供試体を用いた。各供試体は、材齢1日で脱型し、以後各所定材齢まで標準水中養生とした。乾燥収縮ひずみの測定は、コンタクトゲージ法で行った。また中性化促進試験は、温度20±2℃、相対湿度60±5%、炭酸ガス濃度5±0.2%の条件で行った。

3. フレッシュコンクリートの性質

3.1 フレッシュ性状

各調査における高性能AE減水剤の添加量とフレッシュ時の各測定結果を表-6に示す。高性能AE減水剤は、W/Bが小さくなるほどセメントに対する添加量が高くなった。LAとLBを比較すると、同一W/BではLAの添加量が若干高い。これは、LAの方がLBよりも比表面積が大きいことと間隙質相(C₃A+C₄AF)の割合が多いため、高性能AE減水剤の吸着量が多くなったものと推察する。またSF混入の場合は、コンクリートの粘性が低下しており、SF無混入の場

表-4 主なコンクリート調査

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	SF	S	G
LA30 LB30	30	45	170	567	.....	750	922
LA25 LB25	25	43	160	640	.....	702	935
LA25SF LB25SF	25	43	160	576	64	692	922
N25	25	43	160	640	.....	697	933
N25SF	25	43	160	576	64	686	920
LA20 LB20	20	40	160	800	.....	600	906

表-5 測定項目および測定方法

項目	種類	測定方法等
フレッシュコンクリートの性質	スランブフロー値、空気量、単位容積質量、フロー50cm時間等	JIS等に基づく
硬化過程の試験	凝結時間試験	JIS A 6204に基づく
硬化コンクリートの力学的性質	圧縮強度、割裂引張強度、曲げ強度 ヤング係数	JIS等に基づく
上記以外の硬化コンクリートの性質	乾燥収縮	JIS A 1129に基づく
	中性化促進試験	高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)付録に基づく
	凍結融解抵抗性試験	JIS A 6204に基づく

表-6 高性能AE減水剤の使用率とフレッシュコンクリートの性質

記号	高性能AE減水剤添加量 Cx (%)	スランブフロー値 (cm×cm)	フロー50cm時間 (秒)	空気量 (%)
LA30	1.7	62×64	5.0	1.2
LA30SF	1.5	54×54	6.5	2.0
LB30	1.55	67×67	4.3	1.2
LA25	2.55	57×57	10.3	1.2
LA25SF	2.4	57×57	7.4	1.0
LB25	2.4	60×60	8.5	2.4
LB25SF	2.3	53×55	9.6	2.1
N25	2.5	70×70	5.5	1.1
N25SF	2.1	62×62	6.8	1.6
LA20	3.4	56×54	15.2	2.5
LA20SF	2.85	65×67	9.1	1.5
LB20	2.8	69×69	8.8	1.8
N20SF	2.8	54×55	10.5	1.4

合よりも高性能 AE 減水剤の添加量を下げて所要のスランプフロー値を確保することができた。

フレッシュ時の性状としてスランプフロー値は 53~70cm, 空気量は 1.0~2.5% の範囲にあり, 目標値を概ね満足した。スランプフロー値とフロー 50cm 時間の関係を図-1 に示す。SF 無混入の場合は, LA の一部を除き文献 1) による高流動コンクリートの推奨値 (スランプフロー値: 60~70cm, フロー 50cm 時間: 4.5~8.0 秒) の範囲内に概ね入った。一方 SF 混入の場合は, 同一のフロー 50cm 時間に対して, スランプフローが広がりにくい傾向を示した。

3.2 凝結性状

凝結試験の結果を図-2, 3 に示す。図-2 の結果から LA 単味の場合, 水結合材比が小さいほど始発および終結共に早い。SF 混入の場合は, 逆に小さい水結合材比ほど始発が遅れ, 特に W/B=25, 20% では, LA 単味より凝結の始発, 終結が遅くなった。LA20SF を除けば, 普通強度のコンクリートより始発が 2~4 時間程度遅れ, 練混ぜ開始から 8~12 時間後に凝結の始発が始まることを確認できた。また図-3 の結果から W/B=25% では, N の始発が最も早く, 続いて LB, LA と C₃S の割合の高い順となった。また SF 混入の場合は, 高性能 AE 減水剤の添加量がセメント単味使用よりも少ないにも関わらず凝結の始発および終結が遅れた。以上の結果から, 高ビークライトセメントへのシリカフェュームの混入は, 凝結がかなり遅れることを考慮する必要がある。

4. 力学特性

4.1 圧縮強度

W/B=25% における圧縮強度試験結果を図-4 に示す。材齢 28 日以前では, 鉱物組成 C₃S の割合が多い N の強度発現が最も大きく, 続いて LB, LA の順となった。SF 混入の場合は, セメント単味で使用した場合よりも材齢初期において若干強度発現が遅れる傾向を示した。材齢 28 日では, 強度差が小さく 93~103N/mm² の範囲

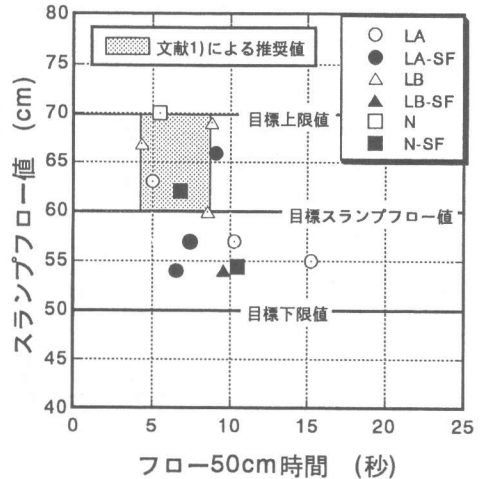


図-1 スランプフローとフロー時間

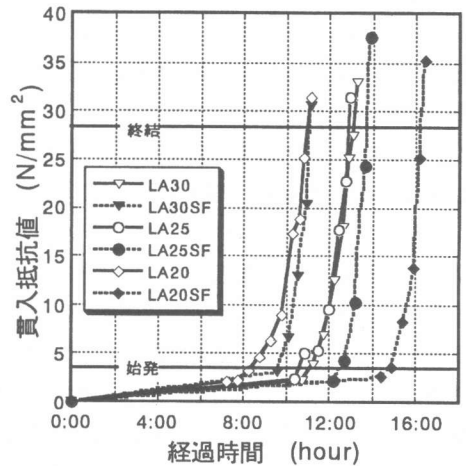


図-2 凝結試験結果 (W/B の比較)

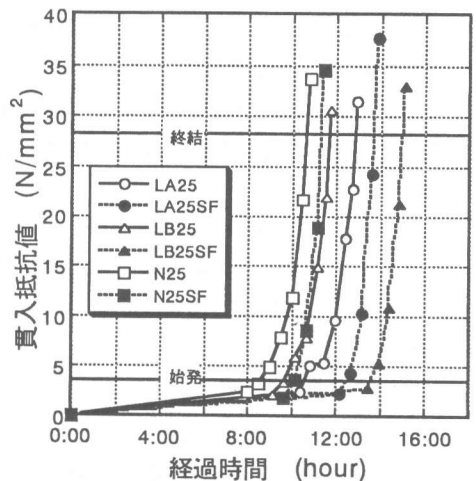


図-3 凝結試験結果 (W/B=25%)

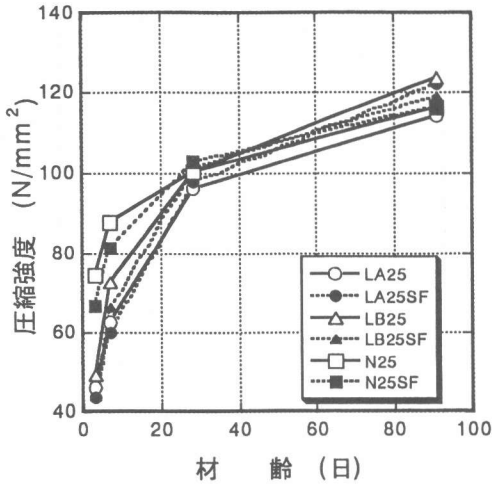


図-4 圧縮強度 (W/B=25%)

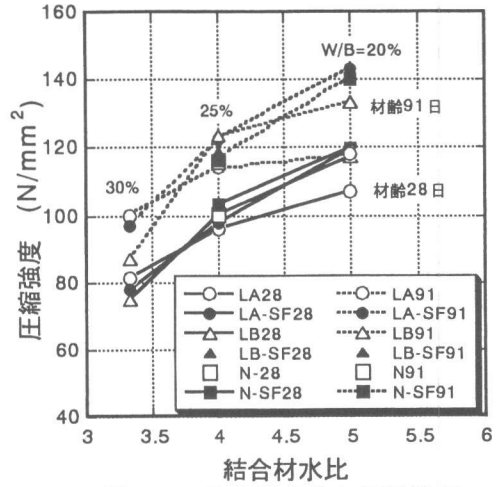


図-5 結合材水比と圧縮強度

を示し、セメント、SF混入の有無の差はほとんど認められなかった。材齢28日から材齢91日までの強度増加は、Nが12~16%増に対し、LAやLBでは17~25%増と高ビーライトセメントを使用した方が大きい結果を示した。

結合材水比と圧縮強度の関係を図-5に示す。LAとLBを比較するとW/B=30%では、LAの方が高い強度を示したが、W/B=25%, 20%では逆にLBの方が高い強度を示した。SF混入の場合は、材齢28日では無混入とほぼ同程度の強度を示したが、材齢91日のW/B=20%では材齢28日からの強度の増進が高ビーライトセメント単味の場合よりも大きく、LA20SFが最高の142.7N/mm²を得た。この結果から、設計基準強度100N/mm²を超える高強度コンクリートでは、高ビーライトセメントにシリカフュームを混入することが、強度面において有利といえる。

4.2 ヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-6に示す。ヤング係数は、圧縮強度の増加に伴い増加し、セメントの種類、SF混入の有無によらずほぼNew RC式²⁾と一致した。

4.3 引張強度

圧縮強度と引張強度(材齢28日, 91日)の関係を図-7に示す。引張強度は、材齢91日のLA20が最高で7.5N/mm²を得た。全体的に高

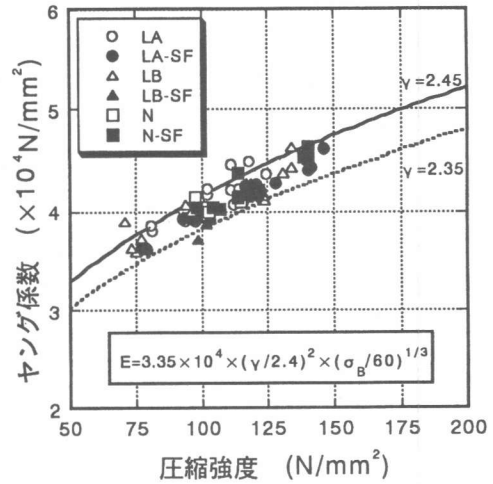


図-6 ヤング係数

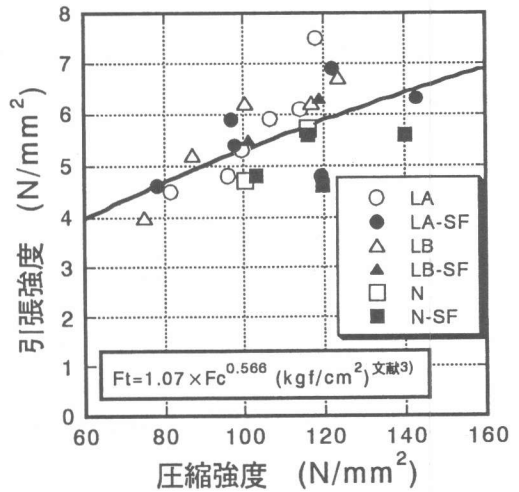


図-7 引張強度

ビーライトセメントを使用した方が普通セメント使用よりも同一圧縮強度に対して高い引張強度を示した。圧縮強度に対する引張強度の強度比は、3.8~6.4%の範囲にあり、圧縮強度が高くなるほど強度比も低下した。また圧縮強度と引張強度の関係は、文献3)で示されている回帰曲線上にほぼ分布した。

4.4 曲げ強度

圧縮強度と曲げ強度（材齢28日）の関係を図-8に示す。曲げ強度は、圧縮強度の増加に伴い若干増加した。最大曲げ強度は、LA20SFの9.6N/mm²となった。同一圧縮強度における曲げ強度は、NよりLAの方が若干高くなった。圧縮強度に対する曲げ強度の強度比は、6.6~8.6%の範囲にあるが、文献3)で示されている回帰曲線に比べ、全体的に1.0~2.0N/mm²程度低い強度となった。この回帰曲線との相違は、使用した骨材、試験体の寸法等が影響したものと推察する。

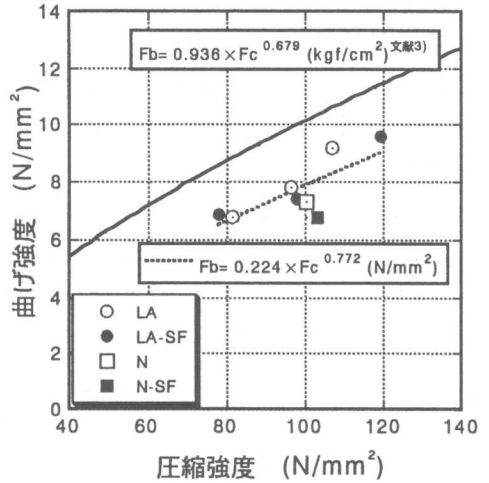


図-8 曲げ強度

5. 収縮特性と耐久性

5.1 乾燥収縮

材齢と乾燥収縮ひずみの関係を図-9に示す。LAの場合、SF混入の有無によらずW/Bが小さいほど乾燥収縮ひずみが小さくなった。しかしSF混入の場合、LA単味よりも材齢1年で収縮ひずみが40~120 × 10⁻⁶大きく、W/Bが小さいほどこの差は大きくなった。N25は、材齢26週まではLA25よりも乾燥収縮ひずみが大きいものの、材齢1年ではほぼ同程度の460 × 10⁻⁶となった。またN25SFでは、N25と同程度の乾燥収縮ひずみを示しており、普通セメントではSF混入による差は認められなかった。

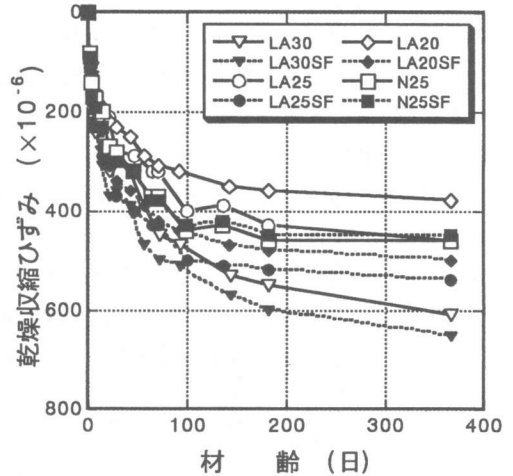


図-9 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみと供試体の重量減少率（重量減少量/供試体の容積×100、単位：%/vol.）の関係を図-10に示す。重量減少率は、NよりもLAの方が高く、またW/Bが大きいほど高くなり乾燥しやすいことがわかった。LAが乾燥しやすい原因としては、Nに比べC₂Sの割合が多いため、乾燥開始材齢における圧縮強度がNより

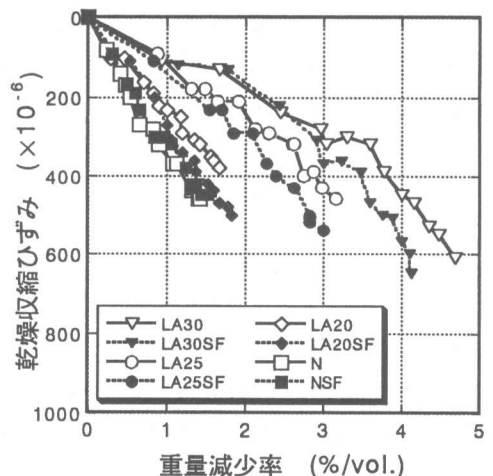


図-10 乾燥収縮ひずみと重量減少率

も低い(N25に比べLA25は25.2N/mm²低い)ことによると推察する。

図-11は、乾燥収縮測定用と同様の供試体を用いて材齢1日目からシールとアンシール条件で測定した収縮ひずみを示す。シールは、エポキシ樹脂により被覆したもので、被覆後の重量減少率は、材齢1年後で最大0.13%/vol.であった。シール条件下における収縮ひずみを比較すると、材齢1年後でLA25が220×10⁻⁶に対してN25では340×10⁻⁶と大きく、高ビーライトセメントを用いたコンクリートでは、普通セメントに比べ水和収縮ひずみや自己収縮ひずみが小さいことが推察される。またSF混入の場合、LA25SFが360×10⁻⁶、N25SFが370×10⁻⁶を示し、特に高ビーライトセメントへのシリカフュームの混入は、水和収縮ひずみや自己収縮ひずみを大きくすることが推察される。

5.2 中性化特性

中性化は、材齢26週まで実施したところセメントの種類、SF混入の有無に関係なく全調合において進行を認められなかった。高ビーライトセメントやシリカフュームを使用したコンクリートは、W/B=20~30%の範囲で中性化が進行しないことが分かった。

5.3 凍結融解抵抗性

300サイクル後の相対動弾性係数と質量減少率を表-7に示す。この結果から、空気量が1.0~2.5%と少ないにも関わらずどの調合も凍結融解抵抗性に優れていることが分かる。これは、高強度化によりコンクリート中のキャピラリー空隙が減少したことによると推察する。

6. まとめ

本実験の結果、以下のことが分かった。

- (1) 高ビーライトセメントおよびシリカフュームを用いた高強度(W/C=20~30%)・高流動コンクリートは、凝結の時間は若干遅れるものの、目標値どおりの施工性(スランプフロー値60cm)を確保することができた。
- (2) 高ビーライトセメントにシリカフュームを

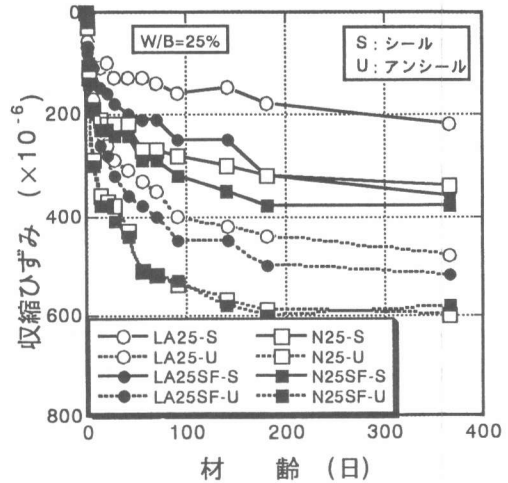


図-11 収縮ひずみ

表-7 凍結融解抵抗性試験結果

	LA20	LA20SF	LA25	LA25SF	N25	N25SF
相対動弾性係数 (%)	101	100	101	97	100	98
質量減少率 (%)	0.2	0.1	0	0.1	0	0

混入することにより、材齢91日で140N/mm²以上の圧縮強度を得ることができた。

(3) 乾燥収縮ひずみは、高ビーライトセメントと普通セメント使用においては、ほぼ同程度である。しかし、高ビーライトセメントにシリカフュームを混入した場合は大きくなる。

(4) 高ビーライトセメントやシリカフュームを使用した高強度コンクリートは、中性化および凍結融解抵抗性に優れている。

参考文献

- 1) 森 博嗣他: 高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.205-206, 1995.8.
- 2) 建設省総合開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」報告書, 建設省, 1993.10
- 3) 友澤史紀他: 高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp497-498, 1990.10