

論文 シリカフェームと低熱セメントを用いた高強度高流動 コンクリートの基礎的性質に関する研究

三井 健郎*1・井上 孝之*2・米澤 敏男*3・小島 正朗*2

要旨: 数種類の高ビーライト系低熱セメントを用いた設計基準強度60~100MPaに相当する強度発現を有する高強度高流動コンクリートの材料, 配合の検討を行った。セメント種類、鉱物組成, 粒度分布, 水結合材比等がコンクリートの流動性, 水和発熱および圧縮強度発現に与える影響が把握され, 粉体シリカフェームと高ビーライト系低熱セメントの組合せにより, 水結合材比20%から30%においてフレッシュコンクリートの粘性の低減, 水和発熱の低減, 高温条件下での構造体強度発現の向上が図れることがわかった。

キーワード: 高強度高流動コンクリート, 高ビーライトセメント, シリカフェーム

1. はじめに

地下タンクや人工島などの地下構造物の大型化, 大深度化に伴い, 連続地中壁や構造体を使用するコンクリートの高強度化の必要性が高まってきた。高強度コンクリートは, 水セメント比が低く, 粘性が高いため, 過密配筋を有する部材への施工が困難であり, 流動性の向上が強く求められている。また, マッシブな部材に打設した場合は, セメント量が多いことから水和発熱による温度上昇が大きく, 温度ひびわれや構造体強度の低下等の問題が生ずる。このため, 大規模構造物に適用する高強度コンクリートでは, 締固め困難な過密配筋内への十分な充填性及び低発熱性及び構造体強度の確保が必要である。本研究は, 鉱物組成, 粒度分布等の異なる高ビーライト系低熱セメント及びシリカフェームを用いた高強度高流動コンクリートの, フレッシュコンクリートの流動性, 水和発熱, 強度発現性状について材料, 配合上の検討を行った結果を報告するものである。

2. 実験の概要

2. 1 使用材料

実験に使用したセメントの品質を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(N), フライアッシュセメントB種(FB)および低熱セメント4種(B60, B50, BH, BS)とした。低熱セメントはいずれもビーライト(C₂S)含有量が普通ポルトランド

表-1 セメント種類および品質

種別	セメント名称	記号	比重	比表面積 (cm ² /g)	平均粒径** (μm)	鉱物組成*(%)			
						C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF
普通	普通ポルトランドセメント	N	3.16	3260	15.9	50	25	9	9
混合	フライアッシュセメントB種	FB	2.97	3180	14.5	(41)	(21)	(7)	(7)
高ビーライト系	低熱ポルトランドセメント	B60	3.24	3130	14.6	25	58	4	10
		B50	3.22	3120	14.5	28	51	4	10
		BH	3.20	4080	12.0	35	46	3	9
		BS	3.04	4720	8.7	(8)	(23)	(1)	(4)

*鉱物組成中()は, ベースメントから混入しているフライアッシュおよび高炉スラグ分を差し引いた値
**レーザー回折式粒度分布測定装置による

*1 (株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部副主任研究員, 工修(正会員)

*2 (株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部, 工修(正会員)

*3 (株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部主任研究員, Ph. D. (正会員)

セメントに比較して多い高ビーライト系セメントある。B60, B50はそれぞれビーライト含有量が約60%と50%である。BHはビーライトの含有量が46%とやや少ないが比表面積が $4,080\text{cm}^2/\text{g}$ と大きい。BSはB60をベースに高炉スラグ微粉末を60%加えたものである。図-1はレーザー回折式粒度分布測定装置[1]により求めた各セメントの粒度分布測定結果を示す。N, FB, B60は $20\sim 25\mu\text{m}$ をピークとしほぼ同様の粒度分布になっているのに対し、BHは $10\sim 15\mu\text{m}$ の粒子が多く、他のセメントより平均粒径が小さい分布を示している。高炉スラグを含むBSでは $3\sim 15\mu\text{m}$ 程度の粒径の粒子がほぼ均等に分布する形状となっており平均粒径は最も小さい。

シリカフュームは粉体シリカフューム（比重2.17, $\text{SiO}_2:92.9\%$ ），細骨材は大井川産川砂（比重2.61, 吸水率1.16%, FM2.81），粗骨材は八王子産硬質砂岩碎石（比重2.66, 吸水率0.48%, FM6.83, 実績率57.7%）を用いた。化学混和剤は特殊ポリカルボン酸系高性能AE減水剤を用いた。

2.2 コンクリートの配合

表-2に実験の因子と水準を示す。セメント6種類の他、水結合材比を20, 25, 30%, シリカフューム混入率を0及び10%とした。コンクリートの配合条件は、スランプフロー $60\pm 5\text{cm}$ 、空気量 $3.0\pm 1.0\%$ 、練り上がり温度 20°C とした。配合はセメント種類によらず各水結合材比で単位水量、単位粗骨材容積が一定となるように定めた。表-3にB60を用いた場合の配合例を示す。

2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜは容量 100l のパン型強制練りミキサーにより行い、モルタルを60秒間練混ぜた後、粗骨材を投入して120秒間練混ぜた。

コンクリートの粘性の評価はLフロー試験[2]により行い、コンクリート出口より 5cm から 10cm の間の水平流動速度をLフロー初速度 $V_1(\text{cm}/\text{sec})$ として求めた。

コンクリートの水和発熱特性は図-2に示す簡易断熱容器を 20°C の恒温高湿室内に静置し、容器内の試料の打

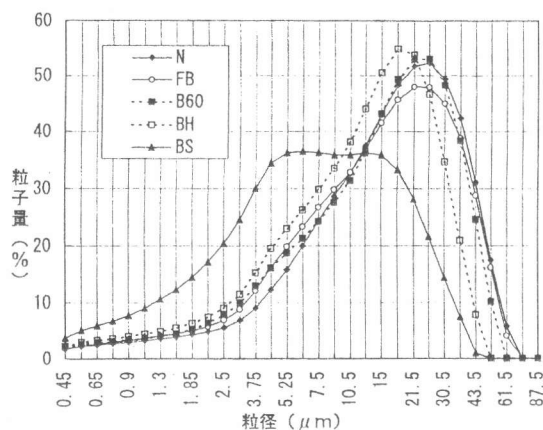


図-1. 各セメントの粒度分布

表-2. 実験の因子および水準

実験因子	水準
水結合材比	20, 25, 30%
セメント種類	N, FB, B60, B50, BH, BS
シリカフューム置換率	0, 10%

表-3. コンクリートの配合（低熱ホトランドセメント(B60)使用）

水結合材比 (%)	S/a (%)	空気量 (%)	単位質量 (kg/m^3)				
			水	セメント	S.F	細骨材	粗骨材
20	47.5	3.0	130	585	65	780	878
25	47.5	3.0	149	536	60	778	878
30	47.4	3.0	165	495	55	775	878

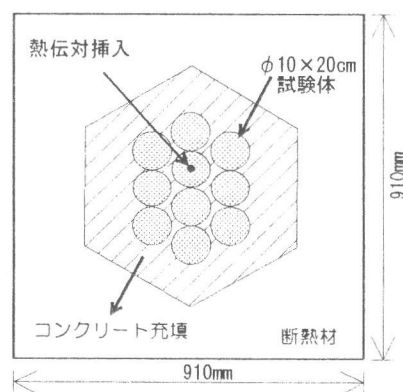


図-2. 簡易断熱容器

ち込み直後からの温度変化測定により評価した。また、コンクリートの凝結時間は、練混ぜから、簡易断熱容器内のコンクリート温度が室温20℃よりも2℃上昇した時点までの時間を凝結時間として評価した。コンクリートの強度発現は標準養生に加えてマッシュな部材での強度発現を検討するため、図-2の簡易断熱容器内で養生したφ10×20cmの封かん養生供試体により材齢7、28及び91日で圧縮強度試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 高性能減水剤の添加量

図-3に同一のスランプフロー値(60±5cm)を得るためのセメント種類、配合と高性能減水剤添加量の関係を示す。水結合材比が30%から20%と極めて低い配合ではセメントNでは高性能減水剤の添加量は急激に増大し多量の添加が必要となる。セメントの鉱物組成のうちC₃Aは混和剤の吸着量が大きいとされる[4,5]が、高ビーライト系低熱セメントでは、N、FBに比べC₃Aの量が少ないことから、高性能減水剤の添加量増大の原因と考えられる。高ビーライト系セメントのうちBHがFBと同程度の添加量を要しているのは、比表面積が大きく平均粒径が小さいためと考えられる。高炉スラグ微粉末を混入したBSは最も少ない添加量となっている。またシリカフュームの混入により、いずれのセメントでも添加量は30~40%程度多くなっている。

3.2 コンクリートの粘性

図-4にはセメント種類、配合とLフロー初速度の関係を示す。水結合材比の低下にともないLフロー初速度は急激に低下し、特に水結合材比20%でシリカフュームを無混入のものはN、FBでは測定不能なほどLフロー初速度は遅く極めて粘性が高かった。またB50、BH、BSでもLフロー初速度は1.0~1.3cm/sであり施工困難なコンクリートであった。シリカフュームの混入によりいずれのセメントにおいてもLフロー初速度は向上したが、セメント種類によりシリカフュームの粘性低減効果は異なる。BHはシリカフューム無混入の場合最もLフロー初速度が大きい値を示したが、シリ

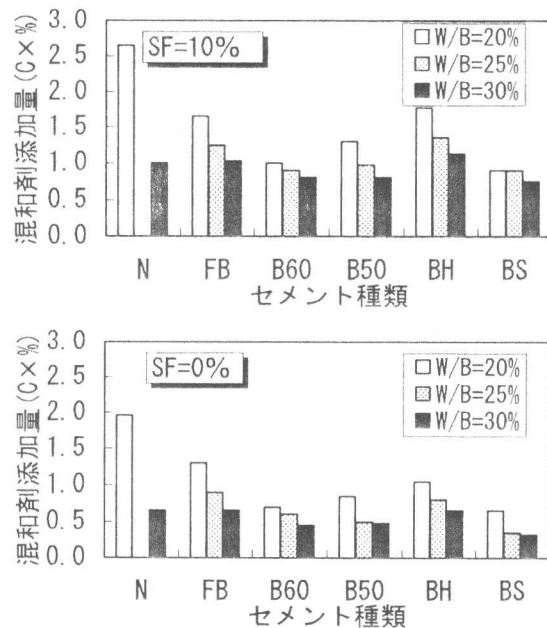


図-3 セメント種類と高性能減水剤添加量の関係

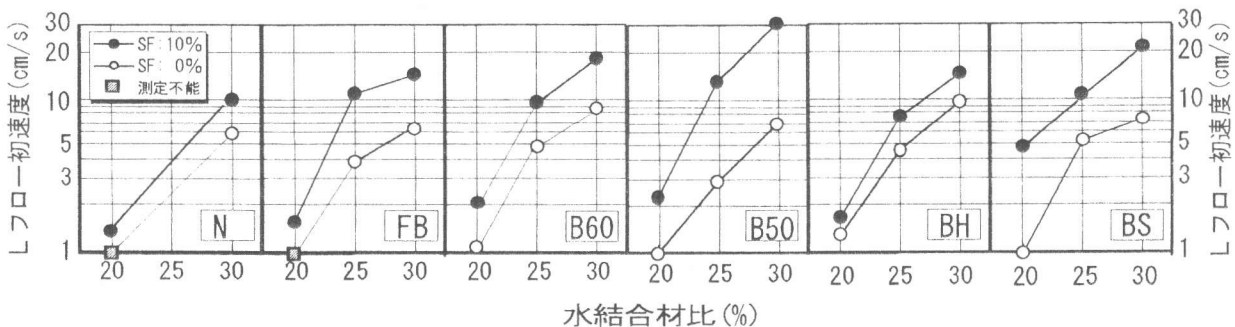


図-3 セメント種類と高性能減水剤添加量の関係

カフューム無混入の場合は最もLフロー初速度が大きい値を示したが、シリカフュームの混入による粘性低減効果は相対的に小さく、シリカフューム混入時のLフロー初速度は他の高ビーライト系セメントよりも遅い値となった。B60, B50, BSではシリカフュームの混入によりLフロー初速度は大きく向上し、シリカフュームの粘性低減効果はB50が最も大きい。高強度コンクリートの流動性の差異に及ぼすマトリックスの影響としては結合材の組成, 粒度分布, 粒子形状など種々の要因が考えられるが, N, FBに比べ, 高ビーライト系低熱セメント及びシリカフュームの組合せは, 20%と低い水結合材比のコンクリートの粘性の低減に効果があると言える。

3.3 凝結時間と水和発熱特性

図-5には水結合材比30%の場合の凝結試験結果を示す。NやFBに比べ, 高ビーライト系セメントのBS, B50, B60は凝結時間は遅くなっている。高ビーライト系セメントは図-3に示したように高性能減水剤添加量が少ないにもかかわらず凝結時間が遅延するのは, 高ビーライト系セメントでは, 初期の水和反応に影響する C_3A 量が少ないことが大きく影響していると考えられる。ただしBHは, N, FBと同程度の凝結時間となっている。これはBHでは, 比表面積が大きく平均粒径が小さいことから, 反応速度が速いためと考えられる。またシリカフュームを混入したものは未混入よりも凝結時間が遅延する傾向にある。これは高性能減水剤の添加量の増大によるものと考えられる。

図-6には打ち込み直後からの簡易断熱容器内の水結合材比30%のコンクリート試料の温度履歴を示す。打ち込み温度(20°C)からの水和発熱による最高温度上昇量はシリカフューム無混入の場合, N及びFBでは56~54°Cであるのに対し, 高ビーライト系セメントBH, B50, B60では33~38°Cと15~20°C程度の温度上昇が低減され, その低減効果は発熱速度の大きい C_3S の含有量の少ないものほど大きくなっている。また高炉スラグ微粉末を含むBSでは単位セメント量が $550\text{kg}/\text{m}^3$ と大きいにもかかわらず温度上昇は24°Cと非常に小さくなっている。シリカフュームの混入によりN及びFBでは最高温度が約7°C程度低減されているが, 高ビーライト系セメントの場合はいずれもシリカフューム混入により最高温度までの到達時間は多少遅くなるものの最高温度上昇量への影響はほとんど見られない。

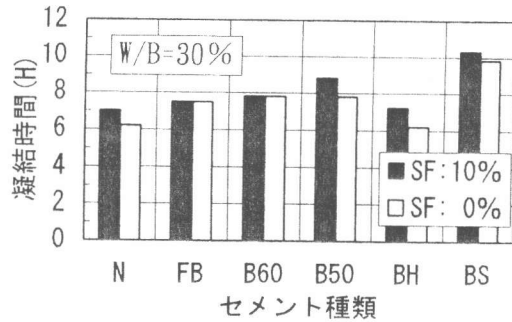


図-5. 凝結試験結果

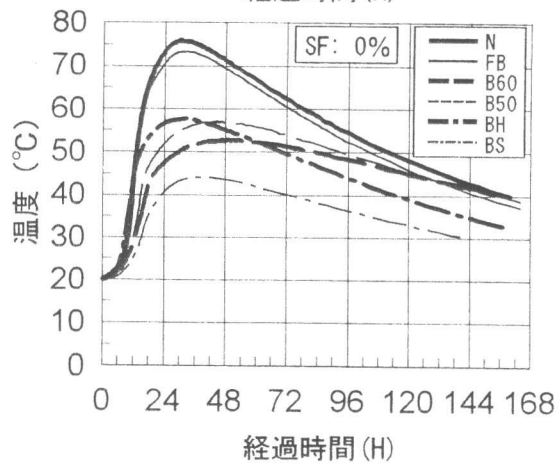
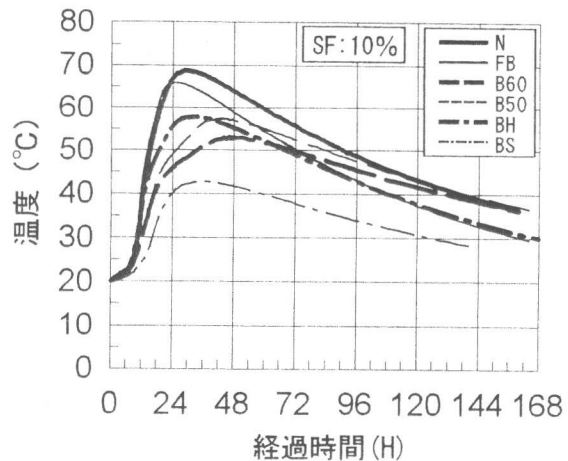


図-6. 簡易断熱養生におけるコンクリートの温度履歴(水結合材比30%)

3. 4 強度発現特性

(1) 標準養生での強度発現

図-7には標準養生条件下での各種セメントを用いたコンクリートの強度発現と材齢の関係を示す。高ビーライト系の低熱セメントは初期材齢での強度発現に寄与する C_3S の量がN, FBに比較して少ないため、BHを除く高ビーライト系セメントでは、材齢7日での強度は、N, FBよりも小さい。高ビーライト系低熱セメントにおける材齢7日強度は、 C_3S 量の最も多いBHの強度が最も高く、以下 C_3S 量に応じて、B50, B60の順となっている。BHは材齢7日での強度はN, FBと同程度の高い強度を示している。これはBHはB60, B50に比較して C_3S 量が多く、 C_2S 量を低く抑えていると同時に、粉末度が高いことに起因すると考えられる。材齢28日以降の長期材齢では高ビーライト系セメントでは材齢28日から91日までの強度の伸びはN, FBよりも大きく、水結合材比20%ではN, FBを上回る強度を示した。ただし高炉スラグを混入したBSでは初期材齢強度が低いと同時に他のセメントよりも材齢91日で40~50MPa低い強度となっている。

(2) 断熱養生での強度発現

図-8に断熱養生条件下での強度発現を示す。材齢初期から高温条件を受ける断熱養生条件下ではセメントの水和反応は急激に進み、いずれのセメントの場合でも標準養生試験体に比べ材齢7日での強度は高いが長期材齢での強度の増加は小さい。水結合材比20%ではBSを除く高ビーライト系セメントは材齢7日以降の材齢でN, FBよりも強度は高く、材齢91日のB50では140MPaに達する良好な強度発現を示した。水結合材比30%ではN, FBに比較して、BHは高い強度発現を示したのに対し、B60, B50の強度は低くなっている。また水結合材比30%の配合でシリカフュームを10%混入した場合、材齢7日での圧縮強度はシリカフューム無混入の配合に比べ5~16MPa向上している。シリカフュームを混入した水結合材比20%の配合では、BSを除く高ビーライト系セメントでは材齢91日で130MPa以上の高い

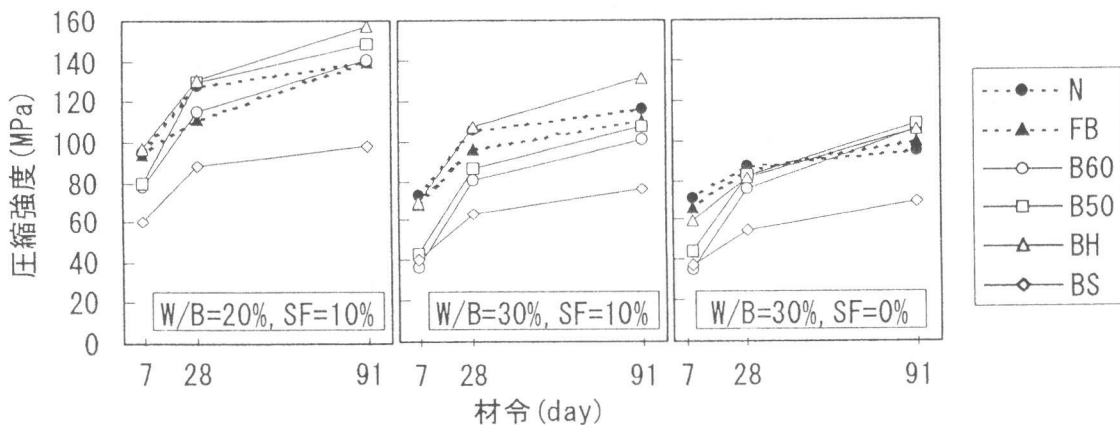


図-7. 標準養生試験体の圧縮強度発現

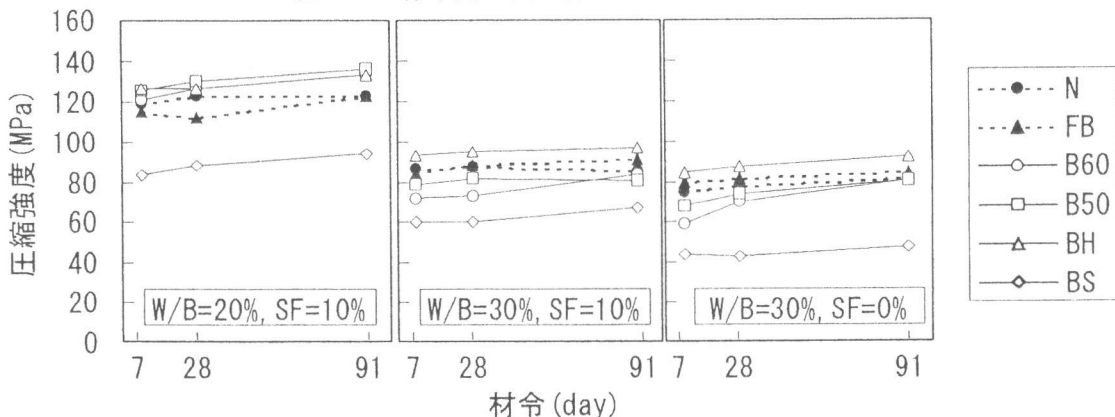


図-8. 断熱養生試験体の圧縮強度発現

強度が得られた。

図-9には、シリカフェーム10%混入の配合の材齢91日での標準養生強度に対する断熱養生強度の比を示す。材齢91日ではいずれのセメントを用いた場合でも、強度比は1.0を下回っており、標準養生に比べ、高温養生条件下での長期強度の伸びの低下を示している。また既往の報告[6]と同様に、水結合材比が小さいほど強度低下は小くなる傾向が見られた。また、Nと比較してBHを除く高ビーライト系セメントの強度比は高く高温養生条件下での長期強度の発現が良好であると言える。BHは断熱養生の強度は高いものの、標準養生の強度の伸びが大きいため相対的に強度比は小さくなっている。BSは強度発現は最も小さいものの、温度上昇が小さいため断熱養生での強度低下は小さかった。

以上より高ビーライト系セメントは、特に低水結合材比でシリカフェームを用いた高強度コンクリート構造体強度の確保に有利な材料であると言える。

4. まとめ

- 1) 高ビーライト系低熱セメントはシリカフェームとの組合せにより、水結合材比が20%から30%と極めて小さい領域でコンクリートの粘性の低減に効果があり、普通セメントや混合セメントに比べ、高性能減水剤の添加量が少なく、流動性の高いコンクリートとなる。
- 2) 高ビーライト系セメントの水和発熱による温度上昇量は普通セメントよりも低減され、 C_3S 量が少ないほど発熱量は小さい。また低熱高炉スラグセメントは最も小さい温度上昇となった。
- 3) 高ビーライト系セメントは、 C_3S 量が少ないため、標準養生の場合、初期材齢での強度発現は小さいが、 C_3S 量を相対的に多くし、また粉末度を高くすることにより初期強度が向上される。また、シリカフェームの混入により高温養生条件下の強度は向上し、水結合材比20%では材齢91日で130MPa以上の強度が得られた。

高ビーライト系低熱セメントを低水結合材比の高強度コンクリートに適用した場合、コンクリートの粘性や水和発熱、強度発現性状は、セメントの鉱物組成、粉末度により異なるため、これらの最適な条件を選択することにより、流動性に優れ、水和発熱が小さく、設計基準強度100MPa以上の高強度コンクリートが製造可能であるといえる。

(参考文献)

- [1]米澤, 柳橋, 池尾, 朝倉: 高強度コンクリート中でのシリカフェームの分散状態の研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp69-74, 1993
- [2]米澤, 和泉, 三井, 奥野: 高強度コンクリートのワーカビリティに関するL型フロー試験法による研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp171-176, 1989
- [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), 1994.5
- [4]朝倉, 吉田, 中永: 鉱物組成の異なるセメントの流動性状に及ぼす高性能減水剤の影響, 第46回セメント技術大会講演集, pp86-91, 1992
- [5]名和, 江口: 高性能減水剤の吸着挙動に及ぼす硫酸塩の影響, セメントコンクリート論文集, No. 43, pp90-95, 1989
- [6]三井, 小島, 米澤, 初期材齢での高温養生条件下における超高強度コンクリートの強度発現に及ぼす骨材品質の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp1025-1030, 1995

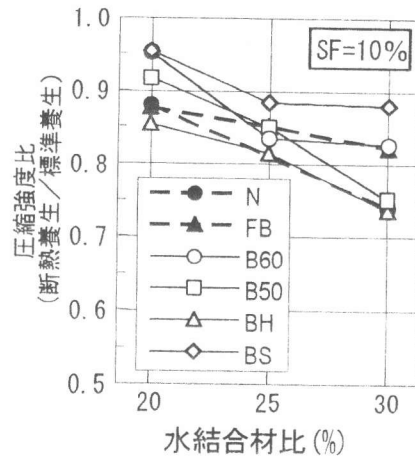


図-9. 標準養生強度に対する断熱養生強度の比 (材齢91日)