

# 論文 100N/mm<sup>2</sup> を超える高強度コンクリートの構造体コンクリート強度に関する考察

一瀬 賢一<sup>\*1</sup>・都築 正則<sup>\*2</sup>

要旨：設計基準強度100N/mm<sup>2</sup>以上を対象として、使用材料(セメント、骨材)の異なる3つのレディーミクストコンクリート工場で実施した実機プラントによる試験練りの各種圧縮強度試験結果について比較・検討した。その結果、シリカフュームをプレミックスしたセメントのうち低熱ポルトランドセメントベースよりも中庸熱ポルトランドセメントベースの方が、標準養生供試体強度は高い。しかし、コア供試体強度は同程度である。また粗骨材だけでなく、細骨材の種類の変動によっても強度発現が大きく異なり、同一水結合材比においても使用材料の違いにより、コア供試体強度は大きく異なることがわかった。

キーワード：高強度コンクリート、コア強度、標準養生強度、簡易断熱養生強度、コンクリート温度

## 1. はじめに

近年、40層以上の高層集合住宅を中心として、設計基準強度100N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造の建物が設計・施工されている。また設計基準強度100N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートは、建設会社とレディーミクストコンクリート工場による建築基準法第37条第二号に基づく国土交通大臣の認定を得たものも多くなってきている。しかし、工場ごとの認定であるため、レディーミクストコンクリート工場ごとに実機プラントによる構造体コンクリート強度を確認する必要がある。

特に設計基準強度100N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートの大臣認定を取得しようとする場合、複数点の水セメント比を設定し、実機プラントにより練り上がり温度の異なる2~3の季節におけるデータを取得した後、審査を受けることになる。このため、施工者は工事開始の1年以上前から認定取得の準備を必要とする。しかも実際取得したデータの妥当性については、比較および評価できる文献や情報が少ない。また今までに発表されている論文や報告は、1工場におけるデータや同一材料によるデータがほとんどであり、セメントや骨材が異なった場合の比較・検討は少ない(例えば1)~4)。

本報告では、設計基準強度100N/mm<sup>2</sup>以上を対象として、3つのレディーミクストコンクリート工場において実施した実機プラントによる試験練り結果のうち、構造体コンクリート強度を中心として、使用材料(セメント、骨材)の違いによるコンクリート強度の発現性状について比較・検討し、考察を加えた。

## 2. 使用材料と組合せ

試験練りは、3つのレディーミクストコンクリート工場(A, B, C工場)で実施した。各工場で使用した材料を表-1に示す。3工場の使用材料の組合せは、膨張材と化学混和剤を除けば異なっている。セメントは低熱ポルトランドセメントにシリカフュームをプレミックスしたものを(以下LSFセメントと称す)をA工場とB工場、中庸熱ポルトランドセメントにシリカフュームをプレミックスしたものを(以下MSFセメントと称す)をA工場とC工場で使用した。骨材は、A工場では、硬質砂岩砕石(GA)と山砂(SA)、B工場では硬質砂岩砕石(GB)と山砂(SB1)、硬質砂岩砕石(GB)と硬質砂岩砕砂(SB2)の組合せ、C工場では、安山岩砕石(GC)と安山岩砕砂(SC)の組合せとした。各骨材の品質を表-2に示す。また膨張材は、石灰系のもの(EX, 密度3.19g/cm<sup>3</sup>)を3工場で使用した。化学混和剤も3工場共にJIS A 6204(コンクリート用化学混和剤)に適合する高性能AE減水剤または高性能減水剤を使用した。また火災時の爆裂抑制を目的として有機繊維(ポリプロピレン繊維またはビニロン繊維)を1~3kg/m<sup>3</sup>添加した。なお強度データは、総て

表 - 1 使用材料

工場	項目	摘要	水準数
A	セメント	低熱ポルトランドセメント+シリカフューム：LSF 中庸熱ポルトランドセメント+シリカフューム：MSF	2
	粗骨材	硬質砂岩砕石：GA	1
	細骨材	山砂：SA	1
B	セメント	低熱ポルトランドセメント+シリカフューム：LSF	1
	粗骨材	硬質砂岩砕石：GB	1
	細骨材	山砂：SB1 硬質砂岩砕砂：SB2	2
C	セメント	中庸熱ポルトランドセメント+シリカフューム：MSF	1
	粗骨材	安山岩砕石：GC	1
	細骨材	安山岩砕砂：SC	2
共通	膨張材	石灰系：EX (密度3.19g/cm <sup>3</sup> )	1
	化学混和剤	高性能AE減水剤, 高性能減水剤	2

\*1 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学)(正会員)

\*2 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任 工修(正会員)

繊維添加後の結果を示す。

### 3. 対象とした項目と測定方法

コンクリートの打設は、各工場共に標準期（4月～6月，9月～11月），夏期（7月～8月），冬期（12月～2月）の各期間において1回以上実施した。水結合材比（以下W/B比と略す）の範囲は，13%～20%とした。単位水量の範囲は，150～160kg/m<sup>3</sup>とした。採取した強度は，標準養生した供試体の強度（以下標準養生強度），簡易断熱養生供試体強度（以下簡易断熱養生強度）および模擬部材供試体から採取したコア供試体強度（以下コア強度）とした。供試体の寸法は総て 100×200mmとした。標準養生強度と簡易断熱養生強度用供試体は，3材齢（材齢28日，56日，91日）にて各3本ずつ採取した。簡易断熱養生は，供試体採取直後に封かん養生とし，900×900×高さ200mmの断熱材を3段に重ね，その中段中央部に入れ，7日間養生し，その後常温下において所定の強度試験材齢まで封かん養生とした。模擬部材試験体は，1000×1000×高さ1000mmとし，側面を木製型枠，上下面を高さ200mmの断熱材で覆った。型枠および断熱材は，材齢7日まで存置した後，撤去した。コア試験体は，材齢28日，56日，91日の3材齢において図1に示すように模擬部材の中央部と外周部から各4本ずつ採取し，強度試験に用いた。また模擬部材中心部の温度も図1に示す位置において熱電対にて測定した。

### 4. 検討結果と考察

#### 4.1 標準養生強度

各工場における結合材水比と材齢28日および材齢91日の標準養生強度の関係を図-2～図-7に示す。

A工場では，骨材を共通として2種類のセメントの比較と膨張材の有無の影響について調べた。この結果から，材齢28日，91日に関わらず同一W/B比では，LSFセメントよりもMSFセメントの方が若干強度発現がよい傾向を示した。LSFセメントでは，EXを混入した場合，W/B比が小さくなると強度発現が若干悪くなる傾向を示した。一方MSFセメントの場合，EX混入の有無による強度差は，認められなかった。この傾向は，材齢28日，91日共に同様であった。材齢28日から材齢91日の強度増進は，LSFセメントよりもMSFセメントの方が大きい。

B工場では，LSFセメントを共通として，膨張材の有無の影響と細骨材（山砂と砕砂）の違いの影響について調べた。この結果から，A工場と同様にLSFセメントを用いた場合は，W/B比が小さくなるとEXを混入することにより強度発現が若干悪くなる傾向を示した。またBS1とBS2の細骨材の違いによる強度差は顕著であり，砕砂のBS2を使用した方が，山砂のBS1を使用する場合より

表 - 2 骨材の品質

種類		表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)
粗骨材	GA	2.70	0.61	6.59	60.7
	GB	2.64	0.63	6.60	60.5
	GC	2.62	2.44	6.71	60.8
細骨材	SA	2.59	2.11	2.61	—
	SB1	2.62	1.80	2.64	—
	SB2	2.60	1.65	2.85	—
	SC	2.62	2.50	2.68	—

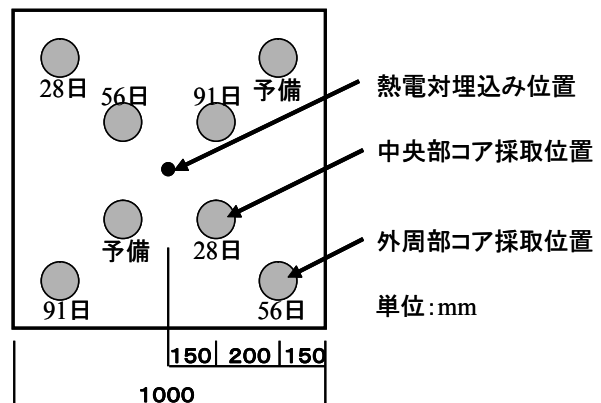


図 - 1 コア採取および温度測定位置

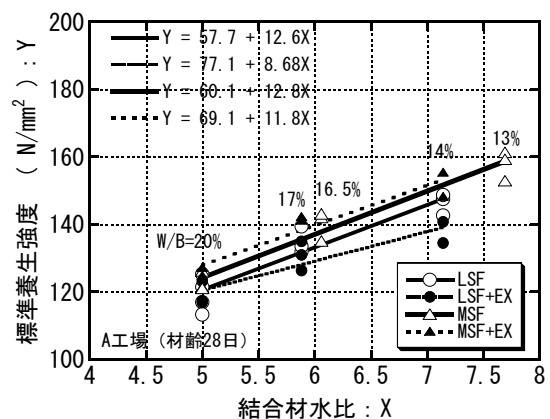


図 - 2 標準養生強度（A工場・材齢28日）

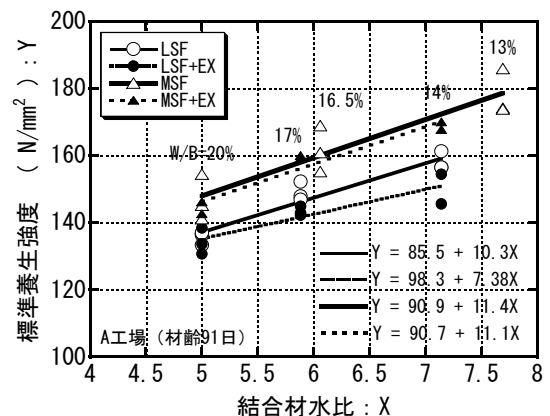


図 - 3 標準養生強度（A工場・材齢91日）

も  $10\text{N}/\text{mm}^2$  以上高い強度を得られた。このことから  $100\text{N}/\text{mm}^2$  以上の強度では、粗骨材だけでなく、細骨材の種類を選定も重要であることがわかる。またBS1を使用したコンクリートは、 $W/B=13\%$ で強度が低下した。一方BS2を使用したコンクリートは、材齢28日から材齢91日にかけての強度増進は認められるものの、 $W/B$ 比17%から14%における強度は、ほとんど同程度であり、強度発現の頭打ちが認められた。

C工場では、MSFセメントを共通として、膨張材の有無の影響を調べた。A工場では、MSFセメントを使用した場合、EXの有無による強度差は認められなかったが、C工場では、 $W/B$ 比が小さくなるほど若干強度発現が悪くなった。これは、単にEX混入の有無の影響だけでなく、砕砂SCを使用することにより、 $W/B=20\%$ ではA工場よりも  $10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度強度が高いことも影響しているものと推察する。材齢28日から材齢91日における強度増進は、A工場と同程度であった。また材齢91日の圧縮強度は、 $W/B=17\%$ と14%で概ね同程度であり、B工場と同様に強度の頭打ちが認められた。

3工場の中では、B工場の材料の組合せ(LSFセメント + EX + SB2)が最も高い強度を得ることができた。

各セメント別にまとめた材齢28日と材齢91日における標準養生強度の関係を図-8、図-9に示す。標準養生強度の材齢28日から材齢91日までの強度増加を  $120\text{N}/\text{mm}^2 \sim 160\text{N}/\text{mm}^2$ の範囲で比較するとLSFセメントでは約  $15 \sim 20\text{N}/\text{mm}^2$ 、MSFセメントでは約  $15 \sim 25\text{N}/\text{mm}^2$ であった。しかし、強度発現の傾向は異なっており、LSFセメントでは  $W/B$ 比が小さいほど強度増加が大きく、MSFセメントでは逆に  $120\text{N}/\text{mm}^2$ ぐらゐにおける強度増加が大きく、 $W/B$ 比が小さいほど強度増加が小さくなった。またEXを混入の有無による影響はほとんど認められない。標準養生強度の材齢28日から材齢91日までの強度発現の違いは、ベースセメントの違いが影響しているものと推察する。

#### 4.2 標準養生強度とコア強度

セメント別にまとめた材齢28日の標準養生強度と材齢91日のコア強度の関係を図-10、図-11に示す。  $120\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の強度では、LSFセメント、MSFセメント共に、概ね材齢28日の標準養生強度よりも材齢91日のコア強度の方が高い。また強度が高くなるほど、91日のコア強度と28日の標準養生強度との差は大きくなった。  $160\text{N}/\text{mm}^2$ (材齢28日標準養生強度)で比較すると、LSFセメントの場合は約  $20\text{N}/\text{mm}^2$ 、MSFセメントの場合は約  $8\text{N}/\text{mm}^2$ 程度、材齢91日のコア強度が高くなった。MSFセメントは、4.1で述べたように材齢28日の標準養生強度がLSFセメントよりも大きいので、このような結果になったものと推察する。また膨張材の有無による強度

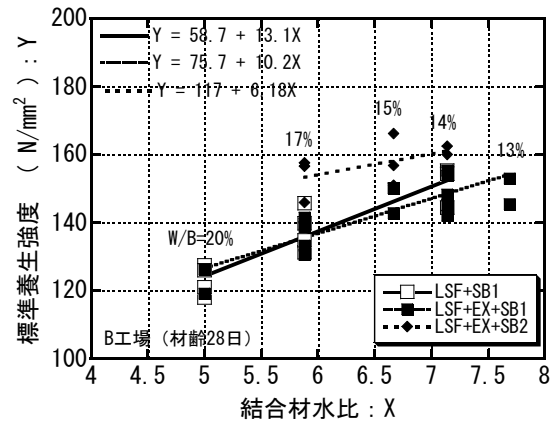


図-4 標準養生強度 (B工場・材齢28日)

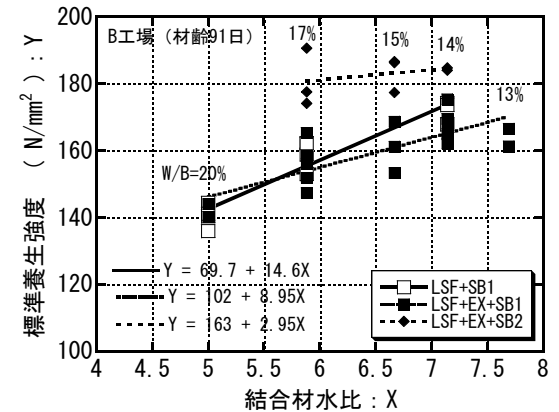


図-5 標準養生強度 (B工場・材齢91日)

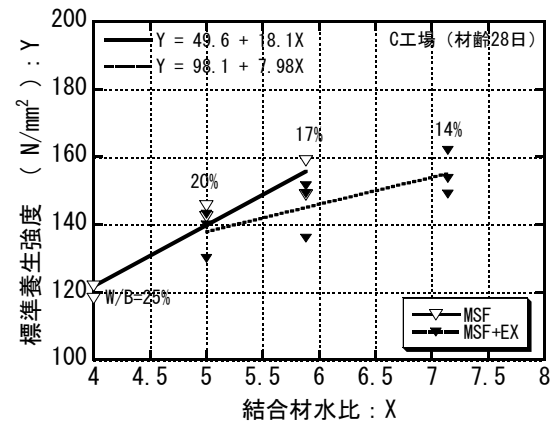


図-6 標準養生強度 (C工場・材齢28日)

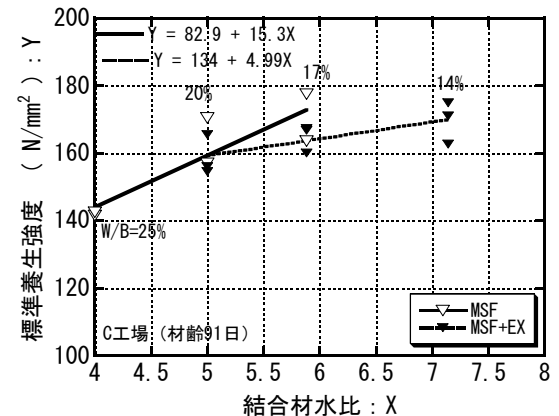


図-7 標準養生強度 (C工場・材齢91日)

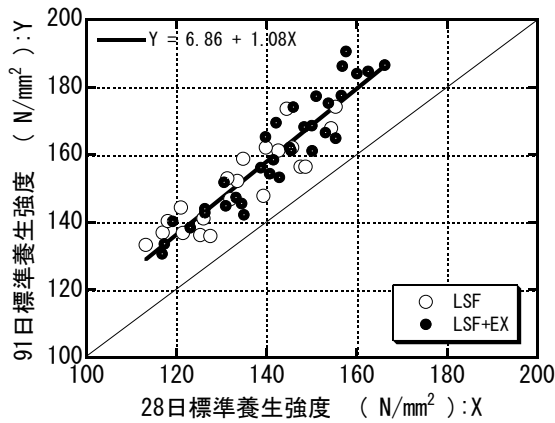


図 - 8 材齢28日と91日の標準養生強度 (LSF)

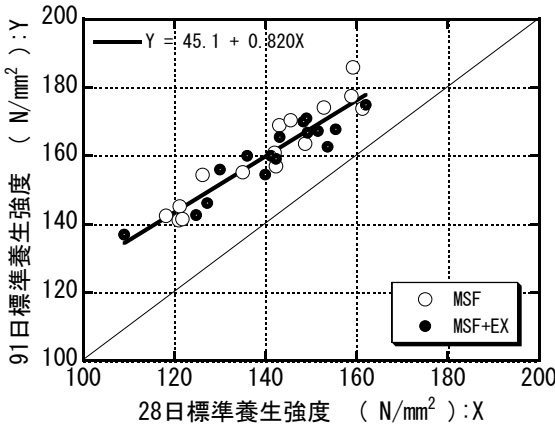


図 - 9 材齢28日と91日の標準養生強度 (MSF)

差は小さかった。

#### 4.3 簡易断熱養生強度とコア強度

材齢91日および材齢28日の簡易断熱養生強度と材齢91日のコア強度の関係を図 - 12, 図 - 13に示す。この結果から、材齢91日の簡易断熱養生強度とコア強度の関係は、概ね同程度の強度であることがわかる。他のセメントを使用した100N/mm<sup>2</sup>以下のデータ<sup>5)</sup>によれば、同一材齢における簡易断熱養生強度とコア強度の関係は、簡易断熱養生強度 コア強度となる。しかしシリカフェームを混入したセメントの場合は、水和熱の影響を受けたコア強度の強度発現がよいことを裏付けている<sup>6)</sup>。また材齢91日のコア強度は、材齢28日の簡易断熱養生強度に対して、概ね同程度以上の強度になっている。このことから材齢28日の簡易断熱養生強度を測定することにより、材齢91日のコア強度を概ね推定できることがわかる。構造体コンクリート強度を材齢28日の簡易断熱養生強度で管理するという可能性も十分あり得ると考える。

#### 4.4 部材温度とコア強度

模擬部材の中心部最高温度と材齢28日および材齢91日のコア強度の関係を図 - 14, 図 - 15に示す。この結果から、コア強度は、模擬部材の中心部最高温度が80

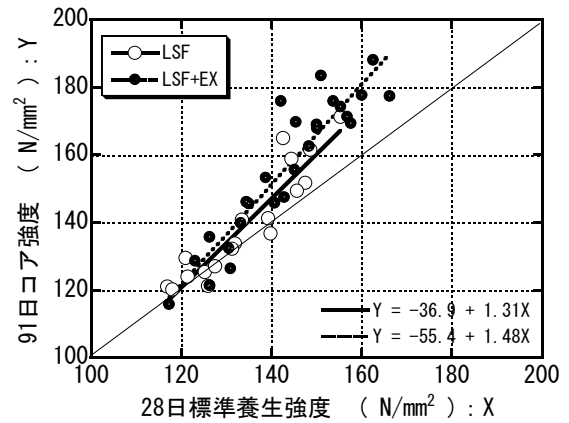


図 - 10 標準養生強度とコア強度 (LSF)

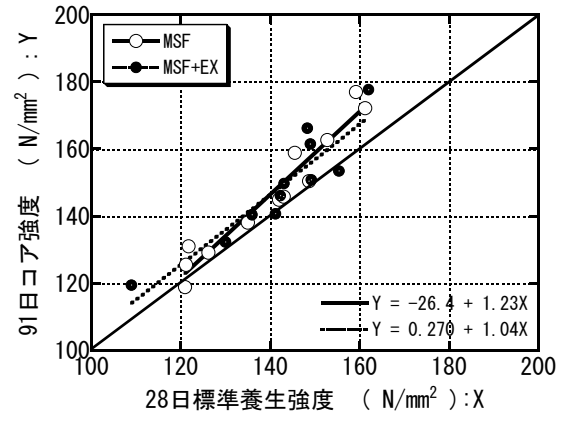


図 - 11 標準養生強度とコア強度 (MSF)

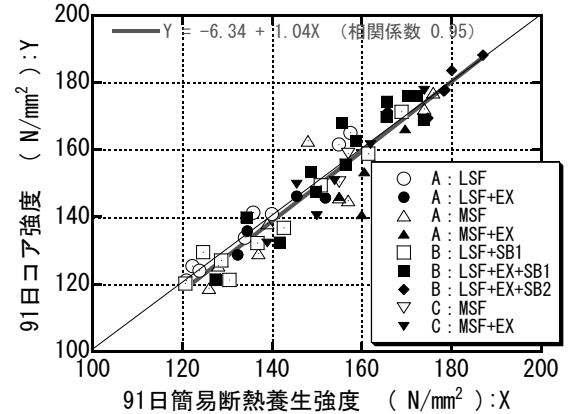


図 - 12 簡易断熱 (91日) とコア強度 (91日)

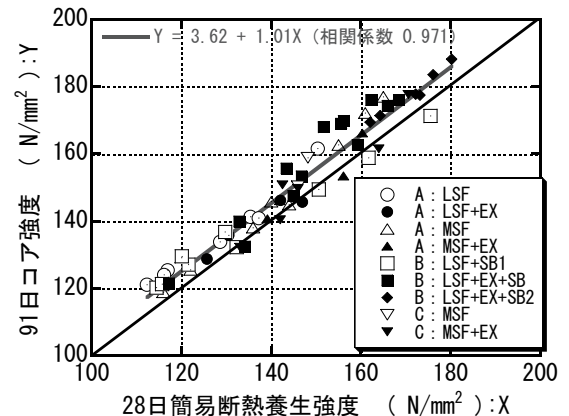


図 - 13 簡易断熱 (28日) とコア強度 (91日)

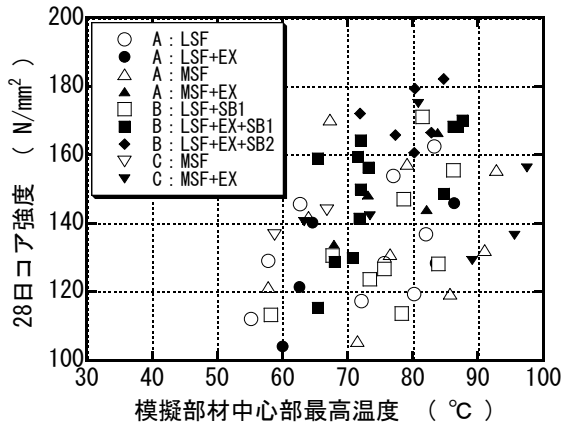


図 - 14 部材最高温度とコア強度 (28日)

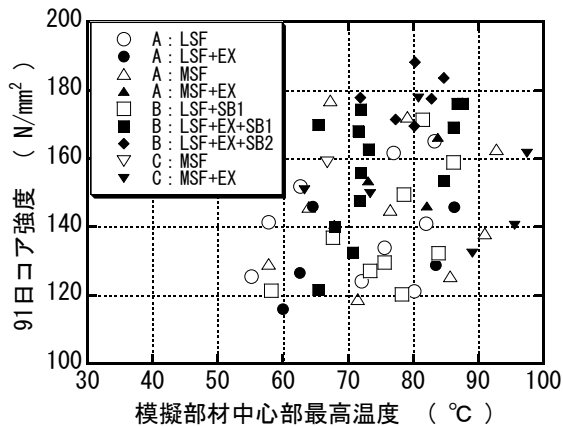


図 - 15 部材最高温度とコア強度 (91日)

~ 85 で最高強度を示した。中心部の最高温度が90を超えた調査は、MSFセメントを使用した調査であり、C工場のMSFセメントに膨張材を混和した調査が最も高い温度を示した。90を超えたものは、W/B比17%以下の調査であり、また総て夏期打設であった。

#### 4.5 コア強度

結合材水比と材齢91日コア強度の関係を図 - 16に示す。また各セメント別の結合材水比と材齢91日コア強度の関係を図 - 17, 図 - 18に示す。この結果から、セメント、骨材の違いにより、同一W/B比において20~50N/mm<sup>2</sup>の強度差が生じており、W/B比14%で強度の頭打ちとなっていることがわかる。この強度差は、打設時期の違いによる影響も含まれているが、材料の違いによる影響が大きい。構造体コンクリート強度を模擬部材のコア強度で管理するとすれば、180N/mm<sup>2</sup>までの確保が可能であることを確認した。

材齢28日と材齢91日におけるコア強度の関係を図 - 19に示す。回帰式から、コア強度の材齢28日から材齢91日までの強度増進は4%であり、設計基準強度60~80N/mm<sup>2</sup>クラスの低熱や中庸熱セメントを使用したコンクリートの強度増進(低熱の場合:19%,中庸熱の場合:13%)<sup>7)</sup>と比較すると著しく小さいことがわかる。

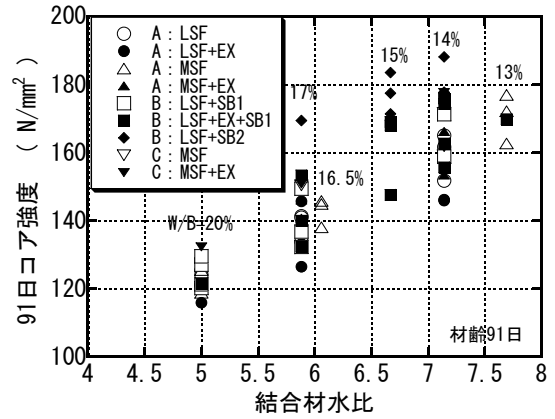


図 - 16 コア強度 (91日)

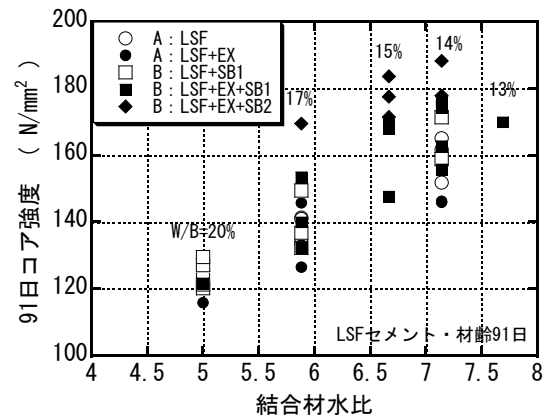


図 - 17 コア強度 (LSF・91日)

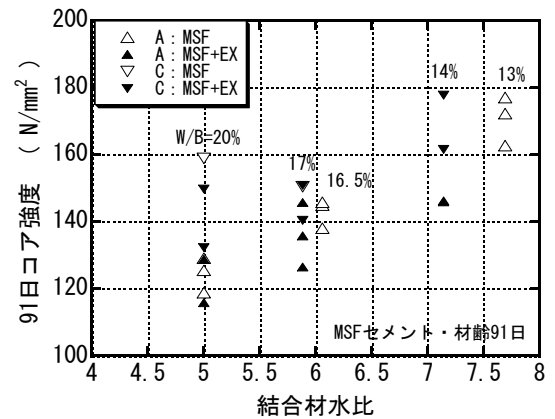


図 - 18 コア強度 (MSF・91日)

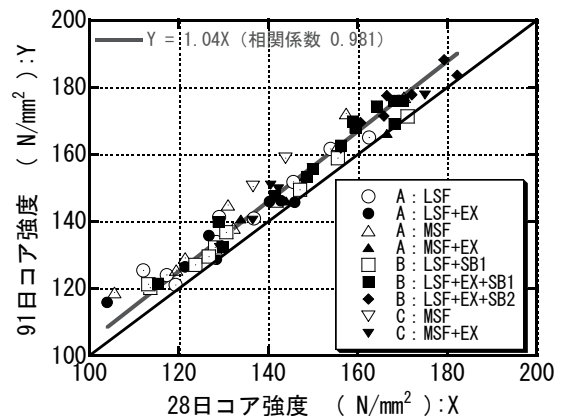


図 - 19 コア強度 (材齢28日と91日)

#### 4.6 コア強度と構造体強度補正值

材齢91日コア強度と構造体強度補正值(以下mSn値,  $m=28, 56, 91, n=91$ )の関係を図-20~図-22に示す。mSn値とは、調合強度を定めるための基準とする材齢(m日)における標準養生供試体の圧縮強度と構造体コンクリート強度を保證する材齢(n日)における圧縮強度との差を表す(mSn値は、0以上の値)<sup>5), 8)</sup>。この結果から、 $m=28$ とした場合は、コア強度が $150\text{N/mm}^2$ 以上になると $_{28}S_{91}$ 値は、負の値を示す。 $m=56, 91$ とするとmSn値は、全体的に大きくなるものの、 $180\text{N/mm}^2$ を超える強度では、相変わらず負の値を示した。このため設計基準強度 $150\text{N/mm}^2$ 以上の調合算定においては、調合強度を定めるための基準とする材齢を56日または91日とすることによりW/B比を大きく設定することが可能となり、また更なる高強度も設定できることが推察できる。

#### 5. まとめ

設計基準強度 $100\text{N/mm}^2$ 以上を対象として、使用材料の異なる3つのレディーミクストコンクリート工場で実施した実機プラントによる試験練りの強度試験結果から以下のことを明らかにした。

- (1) シリカフュームをプレミックスしたセメントのうち、低熱ポルトランドセメントベースよりも中庸熱ポルトランドセメントベースの方が、標準養生強度は高い。しかし、コア強度は同程度である。
- (2) 粗骨材だけでなく、細骨材の種類の選定によっても強度発現が大きく異なる。
- (3) 同一水結合材比においても使用材料の違いにより、コア強度は大きく異なる。

#### 参考文献

- 1) 一瀬賢一ほか：超高強度コンクリートの構造体コンクリート強度発現性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1293-1298，2004.7
- 2) 陣内 浩ほか：設計基準強度 $150\text{N/mm}^2$ クラスの高強度コンクリートによる実大RC柱の施工性と構造体強度発現性状の検討，日本建築学会技術報告集，第17号，pp.1-52003.6
- 3) 河上浩司ほか： $150\text{N/mm}^2$ 級高強度コンクリートの強度発現に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1235-1240，2006.7
- 4) 小島正朗ほか：Fc $200\text{N/mm}^2$ 超高強度コンクリートの開発(その1)，日本建築学会大会(中国)学術講演梗概集，A-1，pp.1087-1088，2008.9
- 5) 日本建築学会編：高強度コンクリート施工指針(案)・同解説，2005.1

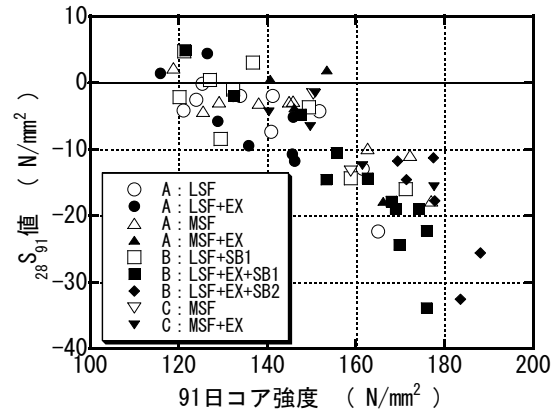


図-20 コア強度(91日)と $_{28}S_{91}$ 値

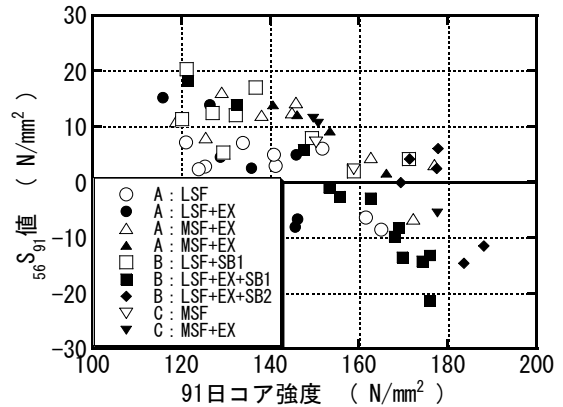


図-21 コア強度(91日)と $_{56}S_{91}$ 値

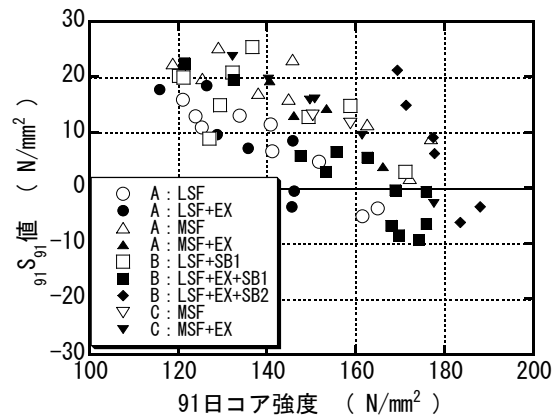


図-22 コア強度(91日)と $_{91}S_{91}$ 値

- 6) 一瀬賢一：超高強度コンクリートの構造体コンクリート温度に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.97-102，2008.7
- 7) 一瀬賢一：各種セメントを使用した高強度コンクリートの構造体強度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1063-1068，2005.7
- 8) 日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2003，2003.2