

# 論文 超高強度コンクリート領域における強度性状に関する一考察

小林 利充\*1・一瀬 賢一\*2・瀧田 安浩\*3

**要旨:** 水結合材比 15%以下の超高強度領域を対象に、複数のレディーミクストコンクリート工場において実機試験練りを実施し、各種強度性状について検討を行った。その結果、結合材として、中庸熱ベースと低熱ベースを比較すると、標準養生強度、コア強度ともに顕著な差異は見られない。骨材の選定は、粗骨材だけでなく、細骨材も強度に影響を及ぼす。各種養生条件による強度結果から、超高強度コンクリート領域の強度発現には、養生温度が強度に影響を及ぼすことを示唆している。強度補正值を無次元化した値  $mRn$  は、標準養生の材齢を 28 日とした場合、高い確率で負の値となるが、91 日とした場合、半数以上が正の値を示す。

**キーワード:** 超高強度コンクリート、標準養生強度、コア強度、加熱養生強度、温水養生強度、補正值

## 1. はじめに

「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」(New RC プロジェクト)<sup>1)</sup>の成果が発表されて以来、高層建築物に鉄筋コンクリート(RC)造が適用される機会が増加している。一般に、高層 RC 造建築物を建設する場合、図-1<sup>2)</sup>に示すように、設計基準強度の要求も非常に高いものとなり、近年においては、設計基準強度 200N/mm<sup>2</sup> までの超高強度コンクリートが実用化されている<sup>3)</sup>。しかしながら、このような超高強度コンクリート領域における強度性状については、いくつかの報告がなされているが(例えば 4)~8)、100N/mm<sup>2</sup> クラスに比べると非常に少なく、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、結合材や骨材が異なった場合の比較・検討は少ない。

本報告では、超高強度コンクリート領域における強度性状の把握を目的に、水結合材比 15%以下を対象として、使用材料、調合条件、打設時期の異なる複数のレディーミクストコンクリート工場において試験練りを実施し、強度性状について比較・検討した。

## 2. 実験データの概要

実験データは、筆者らが 2006 年から 2009 年までに市中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である。実験データの概要を表-1 に示す。

表-1 実験データの概要

工場	項目	摘要
A (東京)	結合材	①低熱+シリカフェーム: LSF(P タイプ) ②中庸熱+シリカフェーム: MSF1(P タイプ)
	細骨材	山砂
	粗骨材	硬質砂岩砕砂
B (東京)	結合材	低熱+シリカフェーム: LSF(P タイプ)
	粗骨材	①山砂, ②硬質砂岩砕砂 ①硬質砂岩砕石 ②硬質砂岩砕石(6号砕石)
C (東京)	結合材	中庸熱+シリカフェーム: MSF1(P タイプ)
	細骨材	安山岩砕砂
	粗骨材	安山岩砕石
D (大阪)	結合材	低熱+シリカフェーム: LSF(P タイプ)
	細骨材	流紋岩砕砂及び山砂(55:45)
	粗骨材	流紋岩砕石
E (埼玉)	結合材	①低熱+シリカフェーム: L+SF ②中庸熱+シリカフェーム: MSF2(P タイプ)
	細骨材	安山岩砕砂
	粗骨材	安山岩砕石(6号砕石)
共通	膨張材	石灰系
	有機繊維	ポリプロピレン繊維またはビニロン繊維
	化学混和剤	高性能減水剤

[注] 低熱: 低熱ポルトランドセメント, 中庸熱: 中庸熱ポルトランドセメント, P タイプ: プレミックスタイプ, MSF2: MSF1 よりもシリカフェームの添加量を高くしたタイプ

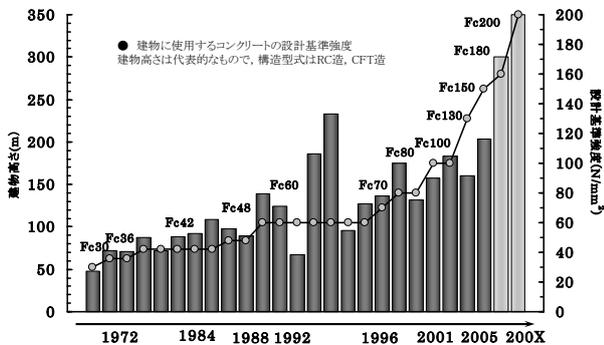


図-1 高層 RC 造建築物の設計基準強度の変遷<sup>2)</sup>

\*1 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 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 上席研究員 博士(工学) (正会員)  
 \*3 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 副主査 工修 (正会員)

実施した工場は、東京都、大阪府及び埼玉県内のレディーミクストコンクリート工場 5 箇所を対象とした。使用材料は、結合材として、①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タイプ(LSF)、②低熱ポルトランドセメントにシリカフュームをコンクリート製造時に添加したタイプ(L+SF)、③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タイプ(MSF1)及び④中庸熱ポルトランドセメントにシリカフューム(③より混入量が高い)をプレミックスしたタイプ(MSF2)の 4 種類とした。骨材は、細骨材に①山砂、②硬質砂岩砕砂、③安山岩砕砂及び④流紋岩砕砂の 4 種類、粗骨材に①硬質砂岩砕石、②安山岩砕石及び③流紋岩砕石の 3 種類を使用した。なお、一部の粗骨材については、JIS A 5001(道路用砕石)に適合する 6 号砕石を使用した。また、膨張材は、JIS A 6202 (コンクリート用膨張材)に適合する石灰系(密度：3.19kg/cm<sup>3</sup>)のものを使用した。化学混和剤は各工場ともに JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤)に適合する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。調査条件は、工場ごとに若干異なっているが、水結合材比(W/B)15%以下において、実機ミキサで製造できる範囲とし、単位水量の範囲は 150~160kg/m<sup>3</sup>とした。コンクリートの打設時期としては、各工場ともに、夏期(7月から8月)、標準期(4月から6月、9月から11月)、冬期(12月から2月)の各期間において1回以上実施した。

検討した強度は、①標準養生強度、②簡易断熱養生強度、③模擬部材から採取したコア強度、④85℃加熱養生強度及び⑤70℃温水養生とし、供試体の寸法はすべてφ100×200mmとした。なお、模擬部材試験体は、□800×H1000mmまたは□1000×H1000mmとし、側面を木製型枠、上下面を厚さ 200mm の断熱材で覆った(2面断熱)。一部の試験体は、側面も 100mm の断熱材で覆った(6面断熱)。型枠及び断熱材は、原則として材齢 7 日まで存置した後、撤去した。なお、模擬部材中央部の温度も熱電対を用いて測定した。模擬部材の概要(一例)を図-2に示す。加熱・温水養生は、供試体作製後、2日間養生室(温度：20±2℃)にて封かん養生の状態の前養生し、その後、1時間当たり 15℃の速度で昇温し、養生温度を保持(加熱養生：3日、温水養生：3、5及び10日)した後、自然冷却した。降温後は、所定の材齢まで恒温恒湿室(温度：20±2℃、湿度 60±5%)に静置した。なお、加熱養生は、試験体を封かん状態にして養生を行った。加熱・温水養生の概要を図-3に示す。

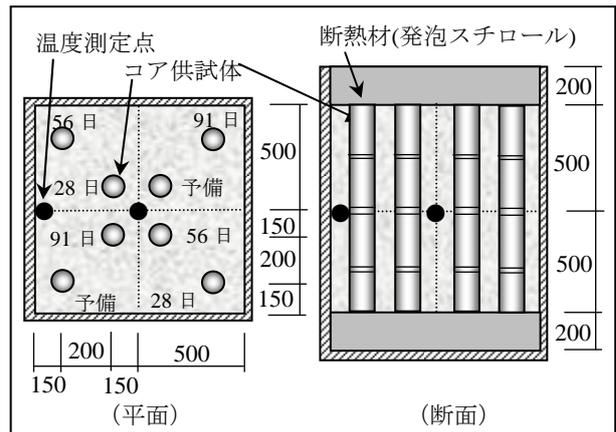


図-2 模擬部材の概要(一例)

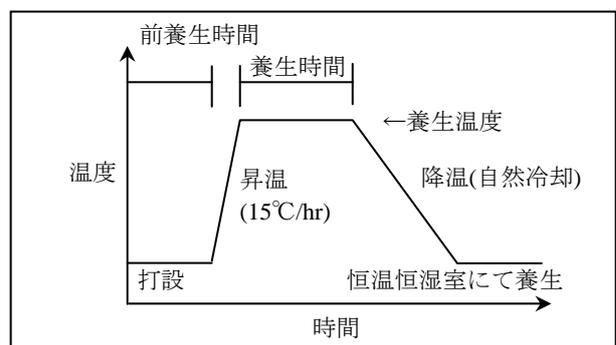


図-3 加熱・温水養生の概要

### 3. 検討結果

#### 3.1 調査条件及び使用材料の影響

##### (1) 結合材水比及び結合材の種類

結合材水比と材齢 28 日標準養生強度、材齢 91 日 2 面断熱コア強度の関係を図-4 及び図-5 に示す。骨材の種類や打設した時期などによっても強度の差異はあるが、相対的な傾向としては、結合材水比の増加に伴って 28 日標準養生強度及び 91 日コア強度は増大する傾向にあり、結合材を L+SF とし、水結合材比 12%とした場合の 91 日コア強度は 210N/mm<sup>2</sup>程度にも達している。また、結合材の影響としては、限られたデータ数ではあるが、同一結合材水比(B/W：7.14)において比較した結果、標準養生、コア強度ともに顕著な差異は認められない。

##### (2) 細骨材の影響

細骨材の種類が強度性状に及ぼす影響を確認するため、B 工場(結合材：LSF)において実施した山砂または硬質砂岩砕砂を用いた場合の結合材水比と材齢 28 日標準養生強度の関係を図-6 に示す。試験結果からも分かるように、いずれの結合材水比においても、細骨材として山砂を用いた場合の強度より、硬質砂岩砕砂を用いた場合の方が高くなる傾向にあり、顕著な強度差が確認できた。本報告では限られた産地の細骨材で比較してい

るが、既往の報告<sup>9)</sup>でも、実施した工場は異なるが、本報告と同様に山砂と硬質砂岩砕砂の影響を検討しており、その結果と符号する。また、硬質砂岩砕砂を用いた場合の強度は、結合材水比の増加に伴って概ね増大する傾向にあるが、山砂を用いた場合の強度は、結合材水比7.14（水結合材比14%）で強度発現の頭打ちになる傾向にある。従って、超高強度コンクリート領域では、渡邊らの報告<sup>10)</sup>にあるように粗骨材の選定も重要であるが、細骨材の種類も強度に影響を及ぼすことが分かる。

### 3.2 養生条件の影響

#### (1) 加熱養生の影響

加熱養生の影響を確認するため、B工場（結合材：LSF）及びE工場（結合材：L+SF、MSF2）において実施した結合材の種類と85℃加熱養生強度の関係を図-7に示す。なお、設定した温度は、一般的な模擬部材の最高温度を想定したものである。この結果からも分かるように、結合材をL+SFとし、水結合材比12%とした場合の材齢7日における85℃加熱養生強度は、210N/mm<sup>2</sup>程度の強度が得られ、3.1で述べた材齢28日の標準養生強度(図-4参照)に比べて著しく高い強度が得られており、養生温度が強度に影響することを示唆するものである。また、構造体コンクリート強度であるコア強度を早期に推定する1つの手法として考えられるが、本検討ではデータ数が限られており、85℃加熱養生強度とコア強度の相関性について明確にはできておらず、今後データの蓄積が切望される。また、本結果では、結合材として中庸熱ベースよりも低熱ベースの方が強度発現に多少優れているが、既往の文献<sup>11)</sup>では結合材の種類による優位性は明確になっておらず、一概に言えない。

#### (2) 温水養生の影響

水結合材比が15%以下と極めて低い領域であるため、セメントに水分を供給する方法として、温水養生の影響を検討している[E工場（結合材：MSF2）]。図-8には、養生材齢と70℃温水養生強度の関係を示す。試験結果からも分かるように、70℃温水養生を行った場合、養生材齢を3、5及び10日と変化させた場合、5日が多少高くなる傾向にあるが、顕著な差異は確認できない。また、3.2(1)で述べた85℃加熱養生と同一条件で比較した場合、ほぼ同様の結果であり、養生条件(水分の供給に伴う)による優位性は見られなかった。

#### (3) 2面断熱及び6面断熱の影響

模擬部材における2面断熱（部材上下を断熱したタイプ）及び6面断熱（部材外周すべてを断熱したタイプ）がコア強度に及ぼす影響を確認するため、B工場（結合材：LSF）及びE工場（結合材：L+SF、MSF2）において実施した結果を図-9に示す。結合材の種類及び材齢にかかわらず、6面断熱コア強度は、2面断熱コア強度

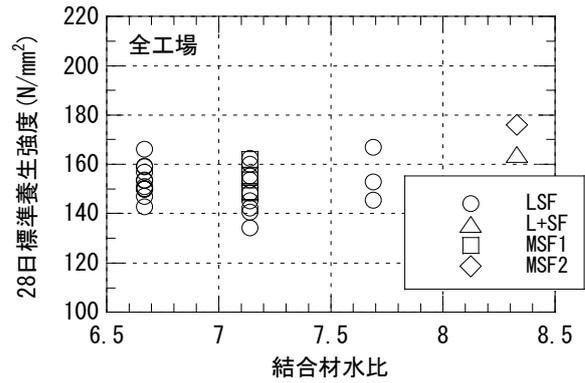


図-4 結合材水比と28日標準養生強度の関係

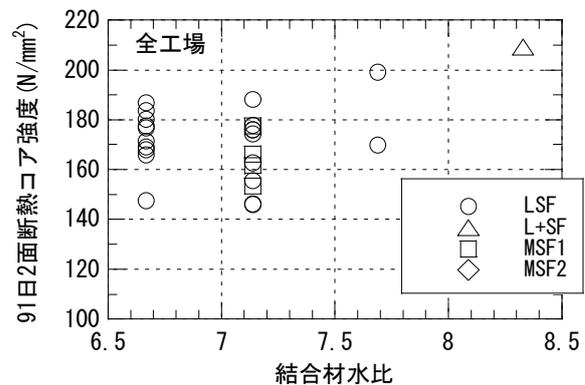


図-5 結合材水比と91日2面断熱コア強度の関係

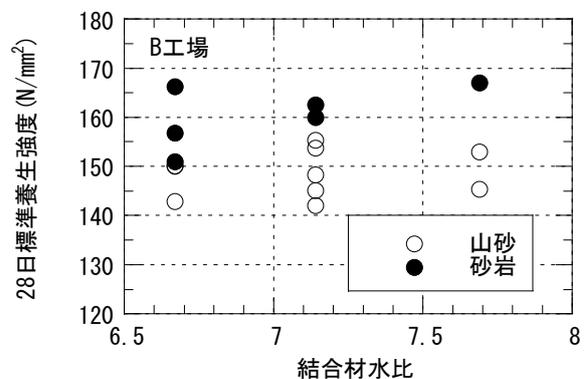


図-6 結合材水比と28日標準養生強度の関係

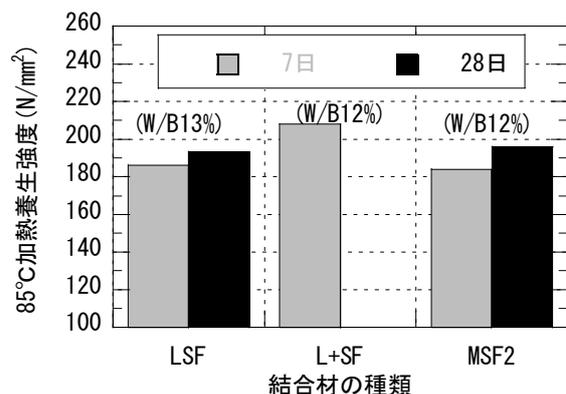


図-7 結合材の種類と85℃加熱養生強度の関係

に比べて高く、 $10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の強度差が認められる。これは、既往の文献<sup>12)</sup>でも同様の傾向が報告されており、超高強度コンクリート領域では、初期の高温履歴を受け、高温環境下にあるほどコア強度が高くなることを示すものである。なお、本実験の範囲では、2面断熱に比べて、6面断熱の方が部材内部の温度が7~10℃程度高い結果であった。

### 3.3 材齢による強度増進の影響

材齢28日から材齢91日までのコア強度の増進を確認するため、結合材の種類及び打設時期を要因にして、水結合材比と91日コア強度/28日コア強度の関係を図-10に示す。いずれの要因にかかわらず、28日から91日のコア強度の増進は、1.0~1.1倍程度であり、想定していた結合材の種類、打設時期、水結合材比による明確な影響は見られなかった。

### 3.4 強度補正值に及ぼす最高温度の影響

強度補正值のデータを整理するに当たり、各データの使用材料の影響を可能な限り取り除くため、式(2)のように、強度補正值(mSn)を標準養生強度(F20m)で除し、無次元化<sup>13)</sup>した値(mRn)を用いた。図-11には、結合材をLSFとMSF1に限定し、模擬部材内の最高温度と無次元化したmRnの関係を水結合材比ごとに整理した結果を示す。なお、図中には、概略的な傾きの変化を検討するため、データの回帰線も併せて示した。

$$mSn = F20m - Fsn \quad (1)$$

$$mRn = mSn / F20m \quad (2)$$

ここに、mSn：強度補正值 (N/mm<sup>2</sup>)

mRn：mSnを無次元化した値 (無単位)

F20m：標準養生材齢m日の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

Fsn：材齢n日構造体コンクリート強度 (N/mm<sup>2</sup>)

整理した結果をみると、28R91においては、いずれの結合材の種類及び水結合材比においても非常に高い確率で負の値を示しており、mRnを極端に大きな負の値としないためには、標準養生の試験材齢を28日以降に設定すべきであることがわかる。なお、材齢を延長し、建築工事標準仕様書JASS5鉄筋コンクリート工事<sup>14)</sup>で示されている材齢の最長期間である91日とした場合には、91R91の半数以上が正の値を示し、極端に大きな負の値を避けることが可能となる。現状のJASS5では、強度補正值は、安全を見て0以上の値(正の値)にすることとしている。従って、0から大きく乖離した負の値となる調査を採用することは、設計基準強度に対して必要以上に高い強度のコンクリートとなる。これは合理的ではなく、むしろ、ワーカビリティの低下や、水和発熱の増大を

招くことになる。

また、各作図の回帰線による傾きを表-2に示しているが、MSF1の13%を除けば、部材内の最高温度が高いほどmRnは小さくなる傾向にある。

表-2 模擬部材内の最高温度とmRnの関係式の係数(傾きa)

結合材の種類	水結合材比(%)	傾き a		
		28R91	56R91	91R91
LSF	14	-0.0045	-0.0038	-0.0013
	15	-0.0074	-0.0032	-0.0006
MSF1	13	+0.0018	+0.0005	+0.0008
	14	-0.0032	-0.0058	-0.0003

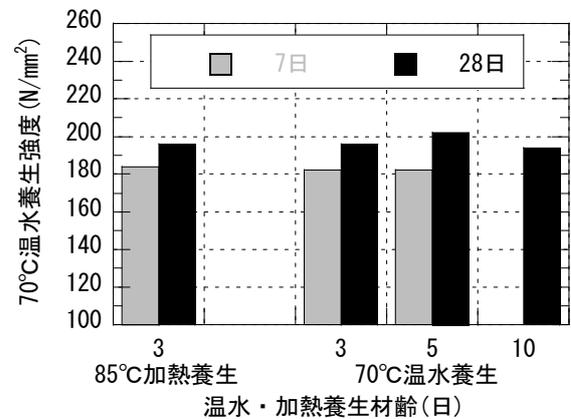


図-8 養生材齢と70°C温水養生強度の関係

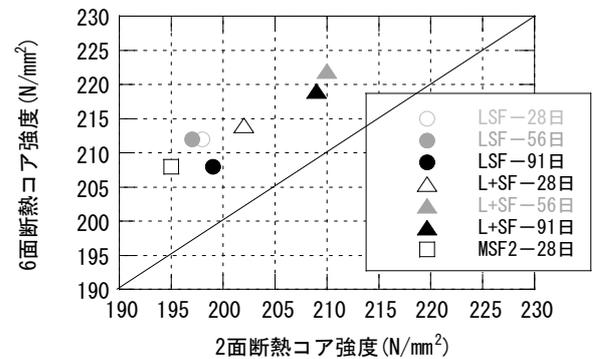


図-9 2面断熱コア強度と6面断熱コア強度の関係

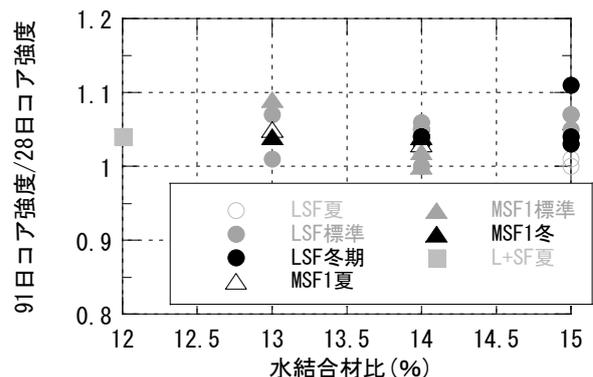


図-10 水結合材比と91日/28日コア強度の関係

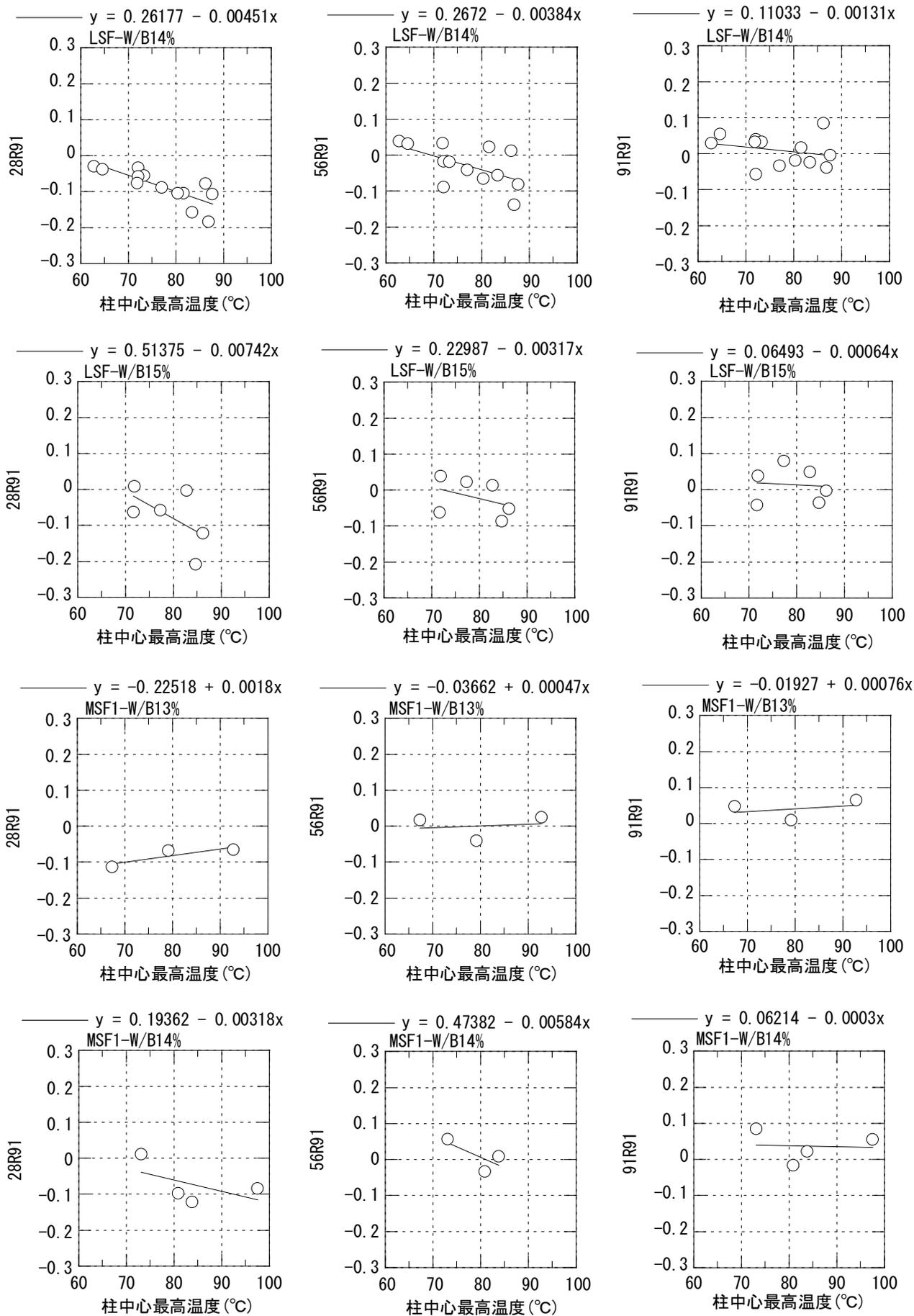


図-11 模擬部材中心温度と mRn の関係

しかしながら、材齢が経過すると最高温度が  $mRn$  に及ぼす影響は緩慢になる傾向にある。なお、前述したMSF1について、限られたデータ数で検討を行っているため、 $mRn$  の挙動については、さらなるデータの蓄積を行って再考したい。

以上のことから、強度補正值を負の値としないためには、材齢を延長することも有効ではあるが、従来から行われてきた標準養生ではなく、加熱養生や温水養生のように、供試体の強度発現を促進させるような手法が必要になるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本報告では、市中のレディーミクストコンクリート工場において、各種結合材を使用し、水結合材比 15%以下の超高強度コンクリート領域での強度性状を検討し、以下のことを明らかにした。

- (1) 結合材の影響として、中庸熱ベースと低熱ベースを比較した結果、標準養生、コア強度ともに顕著な差異は認められない。
- (2) 粗骨材だけでなく、細骨材の種類を選定によっても強度発現が大きく異なる。
- (3) 標準養生に比べて、加熱または温水養生を行うことで強度が増大する。また、模擬部材における 6 面断熱コア強度は、2 面断熱コア強度に比べて高く、養生温度が強度に影響することを示唆している。
- (4) 28 日から 91 日のコア強度の増進は、1.0~1.1 倍程度であり、結合材の種類、打設時期、水結合材比による明確な影響は見られない。
- (5) 使用材料の影響を除くため、強度補正值を無次元化した値  $mRn$  においては、標準養生の試験材齢を 28 日とした場合、いずれの結合材の種類及び水結合材比においても非常に高い確率で負の値を示している。一方、試験材齢を 91 日とした場合は、半数以上が正の値を示し、極端に大きな負の値を避けることが可能となり、調合設計する場合に合理的な水結合材比の設定が可能となる。
- (6) 部材内の最高温度が高いほど  $mRn$  は小さくなる。しかしながら、材齢が経過すると最高温度が  $mRn$  に及ぼす影響は緩慢になる傾向にある。

#### 参考文献

- 1) 建設省総合技術開発プロジェクト：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、(財)国土開発技術センター、1988~1992
- 2) 鳴瀬浩康：超高強度コンクリートとシリカフェーム、セラミックス、V.44, No.6, p.433, 2009
- 3) 高木俊輔、三井健郎、小島正朗、辻大二郎：

- Fe200N/mm<sup>2</sup> 超高性能コンクリートの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), A-1 材料施工, pp.903-904, 2009.8
- 4) 一瀬賢一、都築正則：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、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1489-1494, 2009.7
  - 5) 河上浩司、小出貴夫、西本好克、鈴木康範：200N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートの実用化に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1483-1488, 2009.7
  - 6) 並木哲ほか：設計基準強度 200N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートの実用化に関する研究(その 1~その 3)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), A-1 材料施工, pp.891-896, 2009.8
  - 7) 齋藤和秀ほか：150~200N/mm<sup>2</sup> 級超高強度高流動コンクリートの実験的研究(その 1 及びその 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), A-1 材料施工, pp.897-900, 2009.8
  - 8) 番地成朋、三谷裕二、谷村充、丸山一平：高温度履歴を受けた低水結合材比シリカフェーム混和セメントの強度・水和反応特性(その 1 及びその 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), A-1 材料施工, pp.913-916, 2009.8
  - 9) 小林利充、和田高清、鹿籠泰幸、西浦範昭：Fe150N/mm<sup>2</sup> 超高強度コンクリートの開発、西松建設技報, Vol.31, pp.33-38, 2008
  - 10) 渡邊悟士、黒沢秀介、陣内浩、並木哲：高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究、日本建築学会構造系論文集, No.588, pp.21-27, 2005.2
  - 11) 一瀬賢一、神代泰道、都築正則：超高強度コンクリートの強度発現性におよぼす養生方法の検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1223-1228, 2006.7
  - 12) 陣内浩ほか：設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup> 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, No.17, pp.1-5, 2003.6
  - 13) 寺内利恵子、早川光敬、陣内浩、渡邊悟士：高強度コンクリートの製造管理に用いる供試体の試験材齢と養生方法に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.633, pp.1899-1906, 2008.11
  - 14) 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, 2009