

## 論文 高強度レディーミクストコンクリートの実用化について

小林隆芳\*1・小田部裕一\*1・君島健之\*2・金塚美喜男\*3

**要旨:** 高強度レディーミクストコンクリートの実用化を目的に、製造システムの確立と実構造物を模擬した試験体の強度特性を把握した。さらに、同種コンクリートの実用化に向けての問題点を抽出し、その対策を講じた。上記の製造システムはシリカフュームを混入した高強度コンクリートを対象としたものであり、同種コンクリートの安定的製造が確認された。また、高強度コンクリートのかかえる流動性低下や自己収縮増大という問題を、遅延剤と水和熱抑制剤を用いることで改善した。

**キーワード:** 高強度コンクリート、低熱ポルトランドセメント、シリカフューム

## 1. はじめに

近年、都市部を中心に超高層建築物の建設が盛んに行われている。要求されるコンクリートの設計基準強度は  $100\text{N/mm}^2$  以上にも達しており、当該コンクリートの製造や物性評価が行われている。高強度コンクリートは、温度履歴を受ける構造体コンクリートの強度発現を把握することが重要である。これは、高強度コンクリートが所要の強度を得るために多量の結合材を必要とし、一般のマスコンクリート以上の温度履歴を受けることにより、材齢の経過に伴う強度増進が標準養生の場合と比較してかなり鈍るためである。そのために、実際の構造体コンクリートを模擬した供試体において強度を測定した上で、調・配合設計にフィードバックしている。さらには、JIS に適合しない高強度コンクリートを建築物に使用する場合には、国土交通大臣の認定を得ることが必要である。その認定には、実際の構造体コンクリートを模擬した部材のコア供試体またはこれに類する供試体の圧縮強度と設計基準強度の関係が求められており、所要の構造体コンクリート強度を満足するための調・配合設計を明確に示さなければならない。そのため、上述の供試体の実験結果に基づき、

合理的な調・配合設計を確立する必要がある。また、設計基準強度が  $100\text{N/mm}^2$  近傍のコンクリートには、フレッシュ性状の改善などを目的としてシリカフュームを用いる場合が多く、同種のコンクリートについては製造面から綿密な検討を加え、安定的な供給が求められている。一方、高強度コンクリートの物性面においては、流動性保持や初期ひび割れ抑制対策が不可欠となる。

本研究では、高強度レディーミクストコンクリートの実用化を目的に、製造面から物性に至るまでを実験的に検討した。シリカフュームスラリー化システムを実際のレディーミクストコンクリート工場に設置して、その稼動状況を確認した。また、実規模試験体を作製した上で、温度履歴を受ける構造体コンクリートの強度発現を確認し、調・配合設計方法を裏付けるデータの収集、整理を行った。さらに、流動性保持や自己収縮低減について検討した。

## 2. 試験概要

## 2.1 使用材料およびコンクリート調・配合

セメントは低熱ポルトランドセメント(以下、低熱セメント)を使用した。設計基準強度が

\* 1 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 研究員 (正会員)

\* 2 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 所長 (正会員)

\* 3 東京エスオーシー(株) (正会員)

100N/mm<sup>2</sup>近傍を目標としたコンクリートにはシリカフュームを使用した。シリカフュームはセメントの重量に対して10%置換とし、50%濃度のスラリーで使用した。その他使用した材料を表-1に、コンクリートの調・配合を表-2に示す。コンクリートのフレッシュ性状は練上がり直後のスランプフローが65~80cmとなるように高性能AE減水剤の量で調整した。なお、本試験は長期にわたるため、各材料は試験によって大きな品質に変動がないことを確認しており、表-1中の数値はロット毎の平均値である。

表 - 1 使用材料

| 材料   | 銘柄および産地                                   |
|------|---|
| セメント | 低熱ポルトランドセメント (密度:3.24 g/cm <sup>3</sup> ) |
| 混和材  | シリカフューム (密度:2.20 g/cm <sup>3</sup> )      |
| 細骨材  | 君津産山砂 (密度:2.58 g/cm <sup>3</sup> )        |
|      | 鳥形山産石灰砕砂 (密度:2.66 g/cm <sup>3</sup> )     |
| 粗骨材  | 岩瀬産硬質砂岩 (密度:2.65 g/cm <sup>3</sup> )      |
| 混和剤  | ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤                         |
|      | 遅延剤(グルコン酸ナトリウム)                           |
|      | 水和熱抑制剤(加水分解性クニン酸化合物)                      |

表 - 2 コンクリート調・配合

| W/B (%) | 単用量 (kg/m <sup>3</sup> ) |         |     |     |     |     |
|---------|--------------------------|---------|-----|-----|-----|-----|
|         | セメント                     | シリカフューム | 水   | 山砂  | 砕砂  | 粗骨材 |
| 34      | 471                      | ---     | 160 | 562 | 386 | 842 |
| 30      | 534                      | ---     | 160 | 531 | 365 | 842 |
| 26      | 616                      | ---     | 160 | 492 | 338 | 842 |
| 24      | 526                      | 58      | 140 | 521 | 356 | 837 |
| 20      | 630                      | 70      | 140 | 462 | 317 | 837 |
| 16      | 787                      | 88      | 140 | 374 | 255 | 837 |

## 2.2 試験方法

### (1)シリカフュームスラリー化システム構築

シリカフュームスラリー化システムは、シリカフュームスラリーの製造、貯蔵および濃度管理の設備を有したものである(図-1参照)。同システム構築においては、まず初めに濃度管理を担うセンサーの評価試験を行った。このセンサーは線式密度計であり、測定対象となる物質に放射線を照射させ、線源から検出部に至るまでの放射線の減衰によって物質の密度を測定するものである。今回はこの密度計を配管途

中に設置し、管内を流れるスラリーに放射線を照射させた場合の減衰比とスラリー濃度の関係を求めることによって、濃度計としての適用性を評価した。次に、貯蔵タンクから圧送されるスラリー濃度の均一性を確認するため、配管途中よりスラリーを採取し、JIS A 6207 付属書1の固形分の定量方法に準じて各試料の濃度を測定した。最終的にはシステムを稼働し、シリカフューム混入高強度コンクリートを製造し、それに要する時間やコンクリートの性状から安定的製造の可否を判断した。

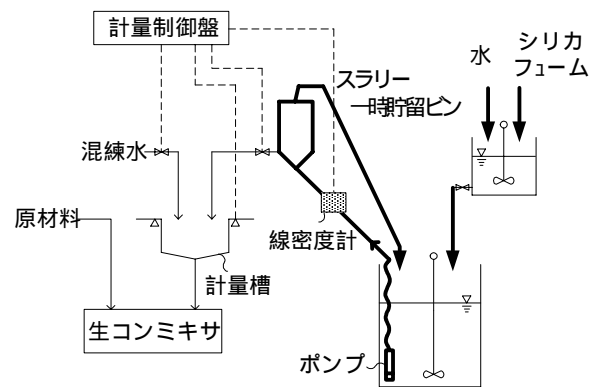


図 - 1 シリカフュームスラリー化システム

### (2)強度特性の確認

本試験で作製した実規模試験体は1mの立方体であり、型枠には木製合板を使用した。試験体上面と底面には厚さ20cmの断熱材を設置し、試験体上下方向の熱移動をおさえ、1m角の柱状構造物を模擬した。コンクリートはシステムを設置した実機プラントで製造し、アジテート車で運搬後、直接型枠内に打設した。打設後直ちに熱電対によって温度を計測し、材齢7日の脱型の時点でこれを終了した。その後、材齢28、91日で試験体よりコアを採取し、別途作製した標準養生供試体強度とコア強度を比較した。これら試験は、環境温度の変化を把握するため、打設時の気温が10(冬期)、20(標準期)、30(夏期)程度となる3つの時期に行った。さらに、これらを既往の報告<sup>1)</sup>に沿って整理した。

### (3)流動性保持の確認

流動性保持は、まず室内におけるスランプフローの経時変化によって確認した。表 - 2 に示したコンクリートは何れも流動性のスランプフローの変化が大きく。これを改善するために微量の遅延剤（グルコン酸ナトリウム）を添加した。この添加率は結合材に対して 0.015 ~ 0.03%とした。室内（静置）において、遅延剤の効果が確認された後、実機製造における確認も行った（アジテート攪拌）。

### (4)自己収縮低減方法の検討

自己収縮低減には遅延剤（グルコン酸ナトリウム）と水和熱抑制剤<sup>2)</sup>（加水分解性タンニン酸化合物）を用いた。対象としたコンクリートは表 - 2 中の W/B=20%のケースとした。それぞれの添加率は予備実験の結果を踏まえ、結合材に対して遅延剤を 0.0625%、水和熱抑制剤を 0.5%とした。さらに低減のメカニズムを考察するため、水和収縮率と細孔径分布を調べた。なお、自己収縮ひずみ、水和収縮率の測定方法は日本コンクリート工学協会発行の自己収縮研究委員会報告書に従って行った。細孔径分布は水銀圧入ポロシメータ（測定範囲：40 μm ~ 2 nm）により測定した。

## 3. 試験結果

### 3.1 スラリー化システム動作確認

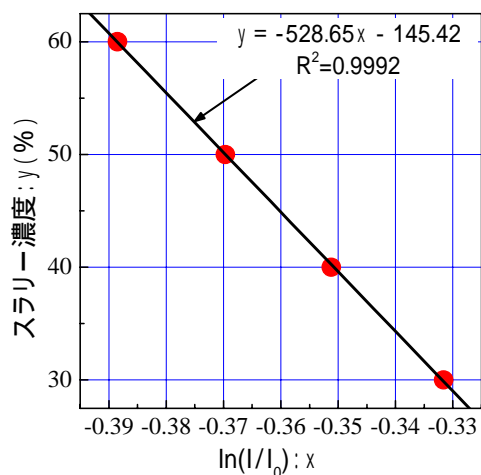


図 - 2 減衰比とスラリー濃度の関係

シリカフュームスラリー濃度と線式密度計の減衰比（線源放射  $I_0$ [cps]、検出部放射  $I$ とした場合の  $\ln(I/I_0)$ ）の関係を図 - 2 に示す。図 - 2 より、両者には良好な相関関係があり、濃度センサーとして、適用可能であると思われる。次に、貯蔵タンクから圧送されるスラリー濃度の均一性を確認した。その結果を表 - 3 に示す。

表 - 3 採取したスラリー濃度

| 測定回数 | 濃度 (%) | 平均 (%) | 標準偏差 (%) |
|------|--------|--------|----------|
| 1    | 49.1   | 49.7   | 0.66     |
| 2    | 50.4   |        |          |
| 3    | 48.7   |        |          |
| 4    | 50.3   |        |          |
| 5    | 49.8   |        |          |

表 - 3 より、スラリー濃度の変動は小さく、JIS A 6207(コンクリート用シリカフューム)の固形分規格値内（±4%以内）に十分収まっていることが分かる。これまでの結果より、システムの各機能は製造に関して問題のないことが確認された。よって、システムを稼働させ表 - 2 中 W/B=20%のコンクリートを3度にわたり製造した。何れも材料投入から排出までに要する時間は約4分であり、高性能 AE 減水剤添加率は結合材に対して 1.7%であった。各回におけるコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度を表 - 4 に示す。

表 - 4 フレッシュ性状および強度

| 回数 | スランプ<br>70-<br>(cm) | 50cm<br>70-時<br>間(秒) | 空気<br>量<br>(%) | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |     |     |
|----|---------------------|----------------------|----------------|---------------------------|-----|-----|
|    |                     |                      |                | 7日                        | 28日 | 91日 |
| 1  | 68×66               | 9.3                  | 1.9            | 85.3                      | 121 | 141 |
| 2  | 70×70               | 8.7                  | 1.2            | 88.0                      | 125 | 149 |
| 3  | 69×69               | 7.1                  | 1.8            | 87.5                      | 119 | 138 |

表 - 4 より、各回ともフレッシュ性状および圧縮強度ともに変動は小さいことが分かる。よって、シリカフュームスラリー化システムを採用することで、高強度コンクリートの安定的な製造の目処がついた。

### 3.2 強度特性の確認

標準養生供試体およびコア供試体の圧縮強度試験結果を図-3に示す。標準期、夏期では、材齢28日の時点では標準養生供試体強度とコア強度の差はそれほど大きくはないが、材齢が経つごとにその差は大きくなっている。冬期では打設後の温度上昇量が小さく(18~28℃)、外気温も低いため、同一材齢で比較した場合、標準養生強度に比べてコア強度は小さくなっている。その差は40N/mm<sup>2</sup>に及ぶものが存在する(W/B=16%の場合)。

今回の試験によって、標準養生供試体強度と実規模試験体より採取したコア強度の結果が得られた。序文で述べたようにJIS規格外の高強度コンクリートの使用申請にあたっては、これらデータを蓄積し、調・配合設計法を明確にしなければならない。そこで、既往の報告<sup>1)</sup>にそって、これまでの結果を整理した。その結果を表

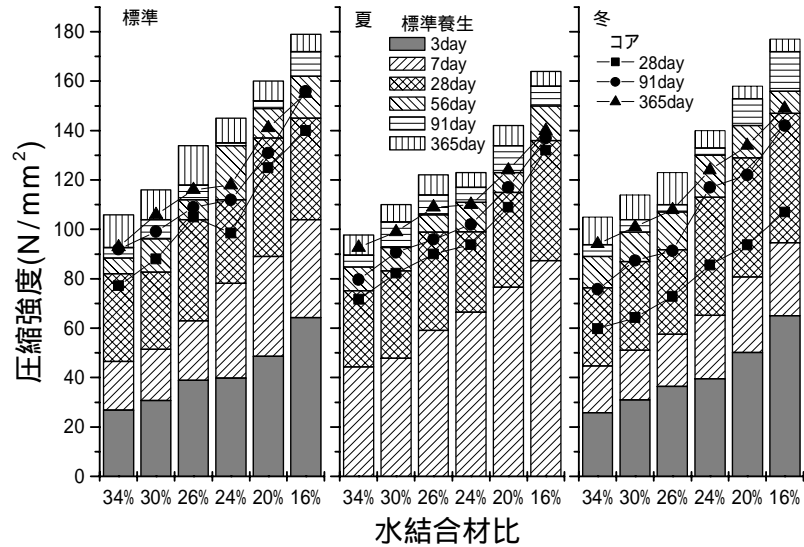


図-3 圧縮強度試験結果

-5に示す。表-5中におけるmFは標準養生供試体強度、nFはコア強度を示している。この手法<sup>1)</sup>は、本来管理すべき構造体コンクリート強度を、標準養生供試体強度を基準に管理できるように、それらの差(mSn:S値)を明らかにし、設計基準強度に割増すことによって調・配合強度を定めるものである。ここで取り上げた手法<sup>1)</sup>ではS値を式(1)により求めている。

$$mSn = \frac{1.2(A_m - A_n)}{1.2A_n - 0.2A_m} \cdot F_q + \frac{A_n B_m - A_m B_n}{1.2A_n - 0.2A_m} \quad (1)$$

表-5 調・配合設計一覧表

| 条件             | 打設時期 | F <sub>q</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | mF=A <sub>m</sub> (B/W)+B <sub>m</sub> |                | nF=A <sub>n</sub> (B/W)+B <sub>n</sub> |                | mSn<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | mF<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | W/B<br>(%) |
|----------------|------|--|--|----------------|--|----------------|-----------------------------|----------------------------|------------|
|                |      |  | A <sub>m</sub>                         | B <sub>m</sub> | A <sub>n</sub>                         | B <sub>n</sub> |                             |                            |            |
| m=28日<br>n=91日 | 標準   | 60                                     | 25.2                                   | 4.71           | 18.9                                   | 36.2           | -21.0                       | 72.0                       | 37.5       |
|                |      | 70                                     | 25.2                                   | 4.71           | 18.9                                   | 36.2           | -16.7                       | 84.0                       | 31.8       |
|                |      | 80                                     | 15.1                                   | 53.8           | 21.0                                   | 24.9           | 8.45                        | 106                        | 28.9       |
|                |      | 90                                     | 15.1                                   | 53.8           | 21.0                                   | 24.9           | 5.26                        | 114                        | 25.1       |
|                |      | 100                                    | 15.1                                   | 53.8           | 21.0                                   | 24.9           | 2.07                        | 122                        | 22.1       |
|                | 夏    | 60                                     | 26.4                                   | -3.32          | 17.6                                   | 29.3           | -12.5                       | 72.0                       | 38.4       |
|                |      | 70                                     | 26.4                                   | -3.32          | 17.6                                   | 29.3           | -5.86                       | 84.0                       | 32.7       |
|                |      | 80                                     | 17.6                                   | 26.0           | 16.7                                   | 32.6           | -3.22                       | 96.0                       | 25.1       |
|                |      | 90                                     | 17.6                                   | 26.0           | 16.7                                   | 32.6           | -2.56                       | 108                        | 21.5       |
|                |      | 100                                    | 17.6                                   | 26.0           | 16.7                                   | 32.6           | -1.91                       | 120                        | 18.7       |
|                | 冬    | 60                                     | 16.7                                   | 28.6           | 16.6                                   | 28.7           | 0.16                        | 72.2                       | 38.3       |
|                |      | 70                                     | 16.7                                   | 28.6           | 16.6                                   | 28.7           | 0.23                        | 84.3                       | 30.0       |
|                |      | 80                                     | 16.2                                   | 46.6           | 12.3                                   | 63.7           | -7.32                       | 96.0                       | 32.8       |
|                |      | 90                                     | 16.2                                   | 46.6           | 12.3                                   | 63.7           | -3.26                       | 108                        | 26.4       |
|                |      | 100                                    | 16.2                                   | 46.6           | 12.3                                   | 63.7           | 0.80                        | 120                        | 22.1       |

注1) F<sub>q</sub>: 60~70N/mm<sup>2</sup>では低熱セメント系、80~100ではシリカフューム混入の調合を基に算定。

注2) mF=F<sub>q</sub>+mSn+2 , ただし, =0.1(F<sub>q</sub>+mSn)。

ここに、 $m$  は標準養生供試体強度の管理材齢、 $n$  は構造体コンクリートの管理材齢、 $A, B$  は結合材水比と圧縮強度の関係における傾き、切片、 $F_q$  は設計基準強度 ( $N/mm^2$ ) を示している。

今回は、一例として  $m=28$  日、 $n=91$  日として調・配合設計法を整理したが、ここで採用した手法<sup>1)</sup>は、任意の管理材齢における標準養生供試体強度と実規模試験体のコア強度を実験的に求めることによって、それに応じた調・配合設計が可能となる。高強度コンクリートの実用化にあたっては、本件で収集したような実験データが必須であり、さらに合理的かつ高精度な調・配合設計を確立するためには温度による影響を的確に捉えることが重要であると思われる。

### 3.3 流動性保持の確認

高強度コンクリートを使用する建築構造物においては、十分な耐力を確保するため鉄筋の配置も過密になると考えられ、施工においては所定の流動性を満足していなければならない。そこで、今回対象としたコンクリートのスランプフローの経時変化を測定し、流動性保持を確認するとともに、流動性保持性能改善の対策を検討した。この対策は、流動性低下の原因はセメント間隙質の初期水和によるもの<sup>3)</sup>とし、これらの反応をコンクリートの運搬時間に相当する間において抑制する目的として微量の遅延剤を用いた。遅延剤は間隙質の反応を抑制するのに効果的であり<sup>4)</sup>、この分散性を高めるため、練混ぜ水に遅延剤を溶解し使用した。スランプフロー経時変化の測定結果を図-5に示す。

図-5より、室内および実機とも微量の遅延剤を使用することによって、流動性保持性能が改善された。なお、遅延剤の使用によって、凝結の遅延、初期強度の低下等デメリットも挙げられるが、遅延剤を使用しないコンクリートの凝結始発時間、材齢1日の圧縮強度がそれぞれ7時間20分、 $25.3N/mm^2$ であったのに対し、遅延剤を0.03%添加した場合には、8時間40分、 $20.9N/mm^2$ であった。よって、若干の凝結

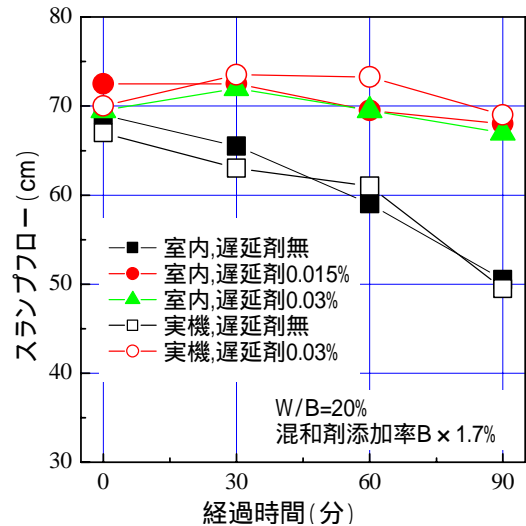


図-5 スランプフローの経時変化

遅延や初期強度低下は生じるが、脱型時期を大幅に遅らせるといったような弊害を引き起こすものでないことが分かった。この遅延剤の添加率に関しては、0.1%まで増加させてみたが、この域まで添加率を増加させると凝結時間は10時間程度遅延するため、流動性保持を目的とした場合は、図-5に示した添加率の範囲が妥当と考えられる。

### 3.4 自己収縮低減方法の検討

高強度コンクリートは使用する結合材量が多いため、自己収縮ひずみは大きくなると指摘されている<sup>5)</sup>。さらに、今回の試験のようにシリカフュームを結合材の一部として使用することで、その量が増大する<sup>5)</sup>。前章で述べた流動性保持性能の確保とともに高強度レディーミクストコンクリートの実用化にあたっては、自己収縮ひずみの低減も一つの解決すべき問題として捉え、ここでは、自己収縮低減方法について検討した。今回は、自己収縮に影響を与える要因の中で、初期の水和反応形態に着目し、クリンカー鉱物の間隙質の反応抑制による自己収縮低減を試みた。間隙質の反応を抑制するために、遅延剤(以下、RTD)と水和熱抑制剤(以下、HCA)を用い、それぞれを単独で使用した場合、併用した場合について、両者とも未使用の場合と比較した。この結果を図-6に示す。

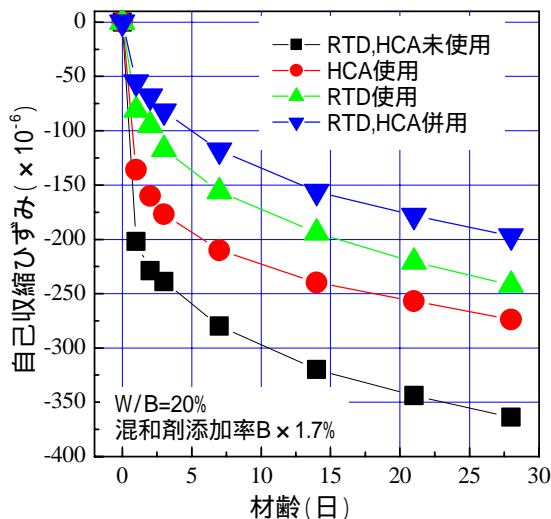


図 - 6 自己収縮ひずみ測定結果

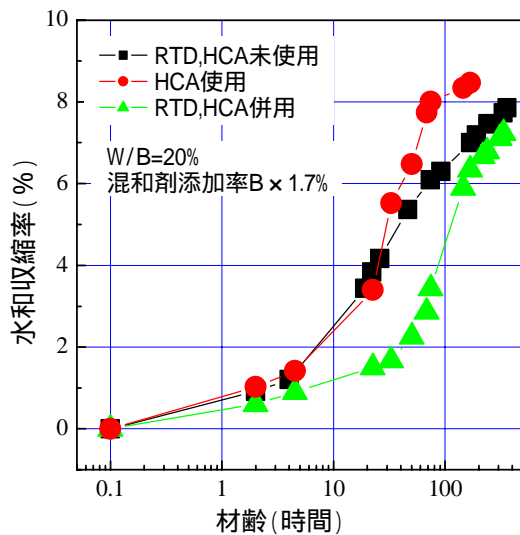


図 - 7 水和収縮率測定結果

図 - 6 より、RTD、HCA 何れも使用しない場合に比べ、前記両者の何れかを単独で使用した場合に自己収縮ひずみが小さくなった。さらに両者を併用した場合には、より大きな低減効果が得られた。図 - 7 に示した水和収縮率の測定結果から、材齢初期において RTD、HCA の有無により水和収縮率の変化が認められ、同時期における水和反応形態の変化が考えられる。つまり、RTD と HCA を併用した場合、水和反応による体積減少が大きな鉱物の反応が抑制されたと思われる。この機構によって材齢初期で急激に増加する自己収縮ひずみが低減されたものと推察される。更に、細孔径分布測定（材齢 7 日）から得られた全細孔量と平均細孔径を比

較すると、RTD と HCA を併用させた場合、0.16ml/ml、20nm だったのに対し、両者未使用の場合は 0.104ml/ml、14nm となり、空隙構造がやや粗くなることが確認された。この空隙構造の変化は、自己収縮の駆動力となる毛細管張力を低減したものと推察される。

#### 4. まとめ

高強度レディーミクストコンクリートの実用化を目的に検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) シリカフュームスラリー化システムを稼働させた場合、シリカフューム混入高強度コンクリートの安定的製造が確認された。また、同システム設置した実機プラントで製造したコンクリートを使用し、標準養生供試体強度と実規模試験体のコア強度の相違を明らかにした。
- (2) 流動性保持確保、自己収縮ひずみの低減を図り、高強度レディーミクストコンクリートの実用化に向けた問題点を改善した。

#### 参考文献

- 1) 牧野真之、江口清、中込昭：高強度コンクリートの調合設計における S 値の算定法、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、Vol.2000、pp.901-902、2000
- 2) 小堺規行他：水和熱制御混和剤を添加したフライアッシュコンクリートの基礎物性、コンクリート工学年次論文集、Vol.13、No.1、pp.77-82、1991
- 3) 宇智田俊一郎、岡村隆吉、武広実：有機混和剤共存下におけるフレッシュセメントペースト及びモルタルの流動性に及ぼすセメントキャラクターの影響、セメント技術大会講演要旨、Vol.44th、pp.104-109、1990
- 4) 伊藤真純、竹内徹：遅延および超遅延のメカニズム、セメント・コンクリート、No.472、pp.31-37、1986
- 5) 自己収縮研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、2002