

# 地中連続壁用超高強度コンクリートの開発

木村 克彦

(技術研究所)

黒田 正信

(土木本部設計第2部)

小野 定

(土木本部技術第1部)

平井 孝典

(土木東京支店技術部)

熊野 知司

(土木本部技術第1部)

## §1. はじめに

構造物の大型化、大深度化、施工方法の変化に伴い施工の合理化、コストダウンの観点から地中連続壁の薄肉化、高強度化が進んできた<sup>1), 2)</sup>。これらの地中連続壁では、強度とともに止水性能も重要な品質で、温度ひび割れ抵抗性も要求品質の一つである。一方、高強度コンクリートに適した低熱ポルトランドセメントの開発、混和剤の改良などにより地中連続壁用の超高強度コンクリートの開発・実用化が進んできた<sup>3), 4), 5)</sup>。

一般に超高強度コンクリートは、水セメント比(以下、W/C)が小さく、粘性が大きいためトレミでの施工に支障が生じることが予想される。また、低W/Cであるために単位セメント量が多く温度ひび割れ制御の観点から対策の検討が必要となる。これに対して、シリカヒューム(以下、SiF)を混入することで、W/Cが小さい場合でも単位水量を増加させることなく流動性および充てん性を向上でき、コンクリートの粘性は小さくなり、トレミでの施工が容易になる。

一方、混和剤のみで対応することも考えられるが、W/Cが20%近くになればセメント量の増加に伴う粘性の増加が卓越することが予想される。

本研究では、①SiFを混入し設計基準強度が90N/mm<sup>2</sup>以上で、②地中連続壁の施工に適し、③温度ひび割れ抵抗性の大きいコンクリートの開発を目標として、セメントに低熱ポルトランドセメント(以下、LPC)を用いて、W/C、SiF混入率、セメント銘柄、混和剤種類を要因とした3シリーズの試験を行う。そして、フレッシュコンクリート、硬化コンクリートの物性および熱特性に及ぼす各要因の影響について検討する。

## §2. 試験概要

### 2.1 要因および水準

各試験シリーズに対する要因と水準を表-1に示す。シリーズ1はW/Cおよびセメント銘柄の影響、シリーズ2は混和剤種類の影響、シリーズ3はSiF混入率の影響に関するものである。それぞれの要因の水準は、W/Cが21, 24, 27および30%の4水準、セメント銘柄がCLおよびSLの2水準、混和剤種類(高性能AE減水剤)がポリカルボン酸系(2種類)およびポリエーテル系の3水準、SiF混入率は0, 3, 5および10%の4水準とする。スランプフロー(以下、SF)および空気量は、地中連続壁への適用を考慮してSF:62.5±5cm, 空気量:2±1%, 50cmフロータイム(以下、FT<sub>50</sub>):5~15秒を目標とする。

### 2.2 使用材料および配合

#### 2.2.1 使用材料

| No. | 要因     | 水準数 | 水準             |
|-----|--------|-----|----------------|
| S1  | セメント銘柄 | 2   | CL, SL         |
|     | W/C    | 4   | 21, 24, 27, 30 |
|     | SiF混入率 | 1   | 10             |
|     | 混和剤    | 1   | Z              |
| S2  | セメント銘柄 | 1   | SL             |
|     | W/C    | 4   | 21, 24, 27, 30 |
|     | SiF混入率 | 1   | 10             |
|     | 混和剤    | 2   | Z, H           |
| S3  | セメント銘柄 | 1   | SL             |
|     | W/C    | 2   | 24, 27         |
|     | SiF混入率 | 4   | 0, 3, 5, 10    |
|     | 混和剤    | 2   | Z, TH          |

表-1 各シリーズの要因と水準

| 記号  | 比重   | 比表面積<br>(cm <sup>2</sup> /g) | 水和熱(J/g) |     | C3S<br>(%) | C2S<br>(%) | C3A<br>(%) | C4AF<br>(%) |
|-----|------|------------------------------|----------|-----|------------|------------|------------|-------------|
|     |      |                              | 7日       | 28日 |            |            |            |             |
| CL  | 3.22 | 3440                         | 216      | 275 | 29         | 54         | 3          | 8           |
| SL  | 3.24 | 3300                         | 182      | 241 | 21         | 59         | 3          | 11          |
| SiF | 2.20 | —                            | —        | —   | —          | —          | —          | —           |

表-2 使用結合材の特性

| 骨材種類 | 産地    | 比重   | 粗粒率  | 備 考     |
|------|-------|------|------|---------|
| 細骨材  | 静岡県浜岡 | 2.60 | 2.80 |         |
| 粗骨材  | 青梅成木  | 2.65 | 6.75 | 砕石、硬質砂岩 |

表一三 骨材の試験結果

| 種 類          | 記号 | 主成分      |
|--------------|----|----------|
| 高性能<br>AE減水剤 | Z  | ポリカルボン酸系 |
|              | H  | ポリエーテル系  |
|              | TH | ポリカルボン酸系 |

表一四 混和剤の性質

| No.  | セメント<br>種類 | 減水剤<br>種類 | W/C<br>% | SiF混入率<br>% | sa<br>% | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     | 混和剤<br>(%) |
|------|------------|-----------|----------|-------------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|------------|
|      |            |           |          |             |         | W                        | C   | S   | G   |            |
| S1-1 | CL         | Z         | 30.0     | 10.0        | 48.3    | 155                      | 517 | 825 | 900 | 2.10       |
| S1-2 |            |           | 27.0     |             | 46.8    |                          | 574 | 777 |     | 2.15       |
| S1-3 |            |           | 24.0     |             | 44.8    |                          | 646 | 716 |     | 2.25       |
| S1-4 |            |           | 21.0     |             | 42.0    |                          | 738 | 638 |     | 2.30       |
| S1-5 | SL         | Z         | 30.0     | 10.0        | 48.4    | 155                      | 517 | 828 | 900 | 2.30       |
| S1-6 |            |           | 27.0     |             | 46.9    |                          | 574 | 780 |     | 2.30       |
| S1-7 |            |           | 24.0     |             | 44.9    |                          | 646 | 719 |     | 2.50       |
| S1-8 |            |           | 21.0     |             | 42.1    |                          | 738 | 642 |     | 2.60       |

表一五 シリーズ1の配合

| No.  | セメント<br>種類 | 減水剤<br>種類 | W/C<br>% | SiF混入率<br>% | sa<br>% | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     | 混和剤<br>(%) |
|------|------------|-----------|----------|-------------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|------------|
|      |            |           |          |             |         | W                        | C   | S   | G   |            |
| S2-1 | SL         | Z         | 30.0     | 10.0        | 48.4    | 155                      | 517 | 828 | 900 | 2.40       |
| S2-2 |            |           | 27.0     |             | 46.9    |                          | 574 | 780 |     | 2.30       |
| S2-3 |            |           | 24.0     |             | 44.9    |                          | 646 | 719 |     | 2.70       |
| S2-4 |            |           | 21.0     |             | 42.1    |                          | 738 | 642 |     | 2.80       |
| S2-5 |            | H         | 30.0     | 10.0        | 48.4    | 155                      | 517 | 828 | 900 | 1.45       |
| S2-6 |            |           | 27.0     |             | 46.9    |                          | 574 | 780 |     | 1.60       |
| S2-7 |            |           | 24.0     |             | 44.9    |                          | 646 | 719 |     | 1.65       |
| S2-8 |            |           | 21.0     |             | 42.1    |                          | 738 | 642 |     | 1.85       |

表一六 シリーズ2の配合

使用する結合材、骨材の試験結果および混和剤の性質を表一三～表一五に示す。表中の混和剤とは高性能AE減水剤である。使用したセメントは、ピーライト量が約55～60%のもので、SiFにはスラリー状（濃度50%）のものを、粗骨材には最大寸法20mmの硬質砂岩砕石を用いる。高性能AE減水剤にはポリカルボン酸系のZおよびTHとポリエーテル系のHを、巻込んだ空気を消すために消泡剤を用いた。

## 2.2.2 配合

各シリーズの配合を表一五～表一七に示す。表中の単位セメント量はSiFを含む量で、混和剤添加量はSFが所定の値になるように添加した実績で、パッチにより幾分異なる。単位水量および単位粗骨材量は、事前に行った試験によりそれぞれ155kg/cm<sup>3</sup>および900kg/cm<sup>3</sup>とする。

| No.  | セメント<br>種類 | 減水剤<br>種類 | W/C<br>% | SiF混入率<br>% | sa<br>% | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     | 混和剤<br>(%) |
|------|------------|-----------|----------|-------------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|------------|
|      |            |           |          |             |         | W                        | C   | S   | G   |            |
| S3-1 | SL         | Z         | 27.0     | 0.0         | 47.6    | 155                      | 574 | 801 | 900 | 2.10       |
| S3-2 |            |           | 27.0     | 3.0         | 47.4    |                          |     |     |     | 2.30       |
| S3-3 |            |           | 27.0     | 5.0         | 47.2    |                          |     |     |     | 2.30       |
| S3-4 |            | TH        | 30.0     | 0.0         | 49.0    |                          |     |     |     | 1.50       |
| S3-5 |            |           | 27.0     | 0.0         | 47.6    |                          |     |     |     | 1.55       |
| S3-6 |            |           | 27.0     | 5.0         | 47.2    |                          |     |     |     | 1.65       |
| S3-7 |            |           | 27.0     | 10.0        | 46.9    |                          |     |     |     | 1.65       |
| S3-8 |            |           | 24.0     | 5.0         | 45.3    |                          |     |     |     | 1.65       |
| S3-9 |            |           | 24.0     | 10.0        | 46.9    |                          |     |     |     | 1.75       |

表一七 シリーズ3の配合

| 試験項目         | 試験方法           |
|--------------|----------------|
| スラングプロ.      | JSCE-F503 による  |
| 50cm70-70-70 | 同上50cm70- 到達時間 |
| スラングプロ. 経時変化 | スラングプロ. 試験に準じる |
| 空気量          | JIS A 1128 による |
| Vロート流下時間     | Vロート試験法による     |
| 塑性粘度、降伏値     | 2ポイント試験方法      |
| BOX充てん性      | 間隙通過試験方法による    |
| 材料分離         | 振動台式試験方法       |
| 加圧ブリーディング量   | JSCE F502 による  |
| コンクリート温度     | 棒状温度計による       |

表一八 フレッシュコンクリートの試験項目

| 試験項目 | 試験方法                 |
|------|----------------------|
| 圧縮強度 | JIS A 1108 による       |
| 弾性係数 | JSCE-G502 による        |
| 引張強度 | JIS A 1113 による       |
| 乾燥収縮 | JIS A 1129* (76°℃) 法 |

表一九 硬化コンクリートの試験項目

## 2.3 試験項目および練混ぜ方法

### 2.3.1 試験項目

フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの試験項目を表一八および表一九に示す。試験方法のうちVロート試験は文献6)で規定された装置を用いる方法、充てん性試験は文献7)のボックス形容器を用いる方法（障害条件1）、塑性粘度および降伏値は文献8)の2ポイント試験方法による。加圧ブリーディング試験では、打設深度約100mを想定して載荷応力を1.43N/mm<sup>2</sup>とした。

材料分離指数（以下、SI）は、φ15\*30のモールドを振動台（振動数60Hz、振幅1.1mm）上で30秒振動させた後にモールド上部および下部から試料を採取し、式（1）により算定する。

$$SI = (G2-G1)/(G1+G2)*100 \quad (1)$$

ここに、

SI；材料分離指数（％）

G1；モールド上部の2ℓに含まれる粗骨材量（kg）

G2；モールド下部の2ℓに含まれる粗骨材量（kg）

塑性粘度および降伏値は、図－1の2ポイント試験結果から図中の測定ポイントのうち4点（●印）を用いて線形回帰し、その勾配および切片を求めて式（2）、式（3）により算定する。

$$\eta = 1/G \cdot h \quad (2)$$

$$\tau = K/G \cdot g \quad (3)$$

ここに、

$\eta$ ；塑性粘度（Pa・s）

$\tau$ ；降伏値（Pa）

K, G；定数 K/G=365, 1/G=22.8

h；回転数とトルクの関係の勾配（図－1参照）

g；切片（図－1参照）

熱特性は、容積が約60ℓの2槽式空気循環式断熱温度試験機を用い、コンクリート温度が20℃で、W/Cが27％の配合について試験する。

### 2.3.2 コンクリートの練混ぜ方法

練混ぜは、骨材およびセメントを粗骨材＋細骨材（1/2）＋セメント＋細骨材（1/2）の順にミキサに投入する。その後10秒間空練りし、水およびSiFを投入後に150秒間練り混ぜる。コンクリートの練混ぜには、パン型ミキサ（容量100ℓ）を用い、1バッチ60ℓ練りとする。なお、試験は20℃で行う。

## § 3. 試験結果

### 3.1 フレッシュコンクリートの性質

#### 3.1.1 試験結果

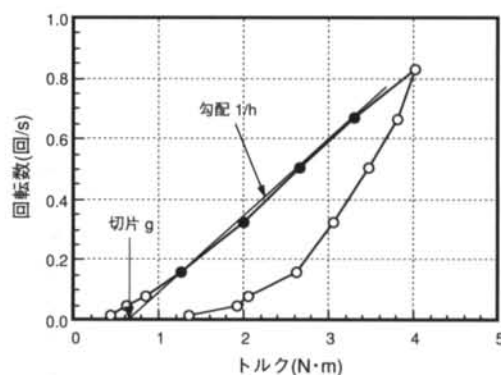
各シリーズのフレッシュコンクリートの主な試験結果を表－10に示す。なお、表中の各シリーズの配合No.の最後の数字は各ケースの繰返し数で、最大3である。さらに、3.2.1の分析では傾向を明確に示すために表－10以外のSFが55cm以下の数データも用いる。

#### 1) シリーズ1

シリーズ1のSFの平均値は60.9cmで、標準偏差2.5cmである。平均値は目標値の62.5cmより約1.5cm小さい。なお、SiFを混入しないコンクリート<sup>9)</sup>に比べてSiFを混入すれば粘性が小さくなるためにSFが幾分小さくても施工性は十分よい。混和剤添加量は、CLに比べてSLが約0.2％多く、セメント銘柄によって幾分差がある。FT<sub>50</sub>の平均値は8.3秒で、標準偏差

| 配合     | スライダ<br>(cm) | スライダ<br>(sec) | Air<br>(%) | Visc<br>(sec) | BOX<br>(cm) | 塑性粘度<br>(Pa・s) | 降伏値<br>(Pa) |
|--------|--------------|---------------|------------|---------------|-------------|----------------|-------------|
| S1-1-1 | 61.0         | 6.9           | 2.2        | 7.8           | 25.5        | 46.0           | 96.0        |
| S1-1-2 | 59.0         | —             | 2.5        | 9.8           | 20.1        | 45.0           | 92.0        |
| S1-2-1 | 58.0         | 9.1           | 1.8        | 9.7           | 17.0        | 52.0           | 122.0       |
| S1-2-2 | 60.5         | 10.1          | 1.9        | 12.6          | 20.3        | 61.0           | 115.0       |
| S1-3-1 | 61.5         | 8.3           | 1.9        | 12.1          | 30.0        | 57.0           | 116.0       |
| S1-3-2 | 59.5         | 9.9           | 2.0        | 12.4          | 28.8        | 74.0           | 164.0       |
| S1-4-1 | 60.5         | 9.2           | 1.7        | 13.1          | 32.5        | 83.0           | 173.0       |
| S1-4-2 | 58.5         | 15.3          | 2.7        | 18.9          | 32.0        | 106.0          | 202.0       |
| S1-5   | 62.5         | 6.4           | 2.1        | 8.2           | 22.0        | 53.0           | 125.0       |
| S1-6-1 | 59.5         | 8.8           | 1.5        | 12.5          | 27.5        | —              | —           |
| S1-6-2 | 61.5         | 7.7           | 1.7        | 8.6           | 27.0        | 56.0           | 165.0       |
| S1-6-3 | 62.5         | 6.5           | 1.8        | 8.5           | 28.0        | —              | —           |
| S1-7-1 | 59.0         | 9.7           | 2.1        | 14.3          | 28.0        | —              | —           |
| S1-7-2 | 64.0         | 6.6           | 1.7        | 16.7          | 12.0        | 63.0           | 146.0       |
| S1-7-3 | 68.0         | 6.0           | 1.6        | 10.4          | 22.5        | —              | —           |
| S1-8   | 58.5         | 11.7          | 1.9        | 18.8          | 29.0        | 91.0           | 235.0       |
| S2-1   | 55.0         | 6.8           | 1.9        | 13.4          | 10.0        | 54.6           | 154.5       |
| S2-2   | 55.0         | 6.4           | 1.7        | 7.9           | 16.0        | 60.0           | 114.5       |
| S2-3-1 | 59.5         | 6.1           | 1.7        | 12.5          | 17.5        | —              | —           |
| S2-3-2 | 61.5         | 6.2           | 1.6        | 11.5          | 25.0        | 68.0           | 87.4        |
| S2-4   | 57.0         | 7.9           | 2.4        | 21.3          | 21.0        | 100.2          | 144.4       |
| S2-5   | 60.0         | 12.2          | 2.5        | 10.6          | 21.5        | 64.7           | 171.5       |
| S2-6-1 | 66.5         | 7.8           | 0.3        | 16.5          | 31.0        | —              | —           |
| S2-6-2 | 60.0         | 12.4          | 1.6        | 17.5          | 18.0        | 82.4           | 215.1       |
| S2-7   | 65.5         | 9.8           | 1.7        | 15.9          | 32.0        | 96.7           | 231.2       |
| S2-8   | 61.5         | 12.4          | 2.0        | 31.6          | 28.5        | 152.5          | 323.7       |
| S3-1   | 68.0         | 7.3           | 2.1        | 16.9          | 31.5        | 356.6          | 96.5        |
| S3-2   | 70.0         | 6.5           | 1.0        | 15.8          | 21.5        | 99.9           | 20.3        |
| S3-3   | 66.0         | 7.8           | 1.7        | 14.9          | 14.5        | 91.1           | 114.7       |
| S3-4   | 58.5         | 14.4          | 1.5        | 28.5          | 18.0        | 97.7           | 96.1        |
| S3-5   | 62.0         | 10.5          | 1.7        | 17.8          | 17.5        | 135.1          | 49.2        |
| S3-6   | 64.0         | 7.7           | 1.9        | 10.3          | 21.5        | 67.2           | 116.1       |
| S3-7   | 59.5         | 8.1           | 2.2        | 7.7           | 27.5        | 55.7           | 157.1       |
| S3-8   | 63.5         | 9.1           | 2.1        | 10.5          | 29.0        | 93.5           | 114.6       |
| S3-9   | 60.5         | 7.8           | 2.5        | 10.0          | 29.0        | 60.6           | 151.4       |

表－10 フレッシュコンクリートの試験結果



図－1 2ポイント試験結果の例

は3.2秒である。W/Cが21%の配合では、FT<sub>50</sub>が大きい傾向にあるが、これはセメント量が多くなり粘性が大きくなったこととSFが幾分小さいことによる。

Vロート流下時間（以下、Vロート）は、SiFを混入したためにモルタルと粗骨材との付着力が大きくなりスムーズに流下する傾向が認められた。とくに、W/Cが21%の配合でも塑性粘度は、約100Pa・sと大きいとはいえず、モルタルと粗骨材との付着力は、塑性粘度とは別の性能のようである。塑性粘度は、SiFを混入することによって無混入に比べて約半分と小さくなっており<sup>9)</sup>、降伏値についても同様の傾向が認められる。

## 2) シリーズ2

シリーズ2のSFの平均値は60.2cmで、標準偏差は3.9cmである。平均値は目標値より約2cm小さい。S2-1～S2-4は、S1-5～S1-8と同一配合であるが、混和剤添加量が幾分増加したものがある。これは骨材粒度の変化によると推測できる。FT<sub>50</sub>の平均値は8.8秒で、標準偏差は2.7秒である。混和剤Hを用いた配合のFT<sub>50</sub>は、混和剤Zに比べて大きく、粘性が大きい傾向にある。また、シリーズ1およびシリーズ2の混和剤（Z）およびSLを用いた配合とを比較すればFT<sub>50</sub>は大差なく、Vロートおよび塑性粘度についてもシリーズ1と同じ傾向を示している。

## 3) シリーズ3

シリーズ3のSFの平均値は63.6cmで、標準偏差は3.9cmである。平均値は目標値の62.5cmに比べて幾分大きい。FT<sub>50</sub>の平均値は8.8秒で、標準偏差は2.4秒である。混和剤Zを用いた配合とTHを用いたシリーズ3では、SF、FT<sub>50</sub>、塑性粘度などは大差なく、SiF混入率の影響についてもシリーズ2と大差ない。

## 4) SFおよびFT<sub>50</sub>の経時変化

シリーズ1のW/Cが27%のS1-2およびS1-6のSFおよびFT<sub>50</sub>の経時変化を図-2に、図-2のSFとFT<sub>50</sub>との関係を図-3に示す。S1-2のSFは、練上がりから10分後に増加している。このようにSFが小さい場合には練り時間が幾分不足していることが考えられる。10分後からのSFの低下傾向は、いずれのケースもほぼ同じである。混和剤添加量が多いためSF保持時間の面では問題ないが、SFを大きくした場合にはSFの保持時間も長くなり、側圧の面から施工上問題となることが予想される。FT<sub>50</sub>は、SFが55cm以上であれば20秒以下である。図-3から、セメントにCLおよびSLを用いた両ケースもSFとFT<sub>50</sub>との関係は大差なく、SFが同じであればFT<sub>50</sub>もほぼ同じである

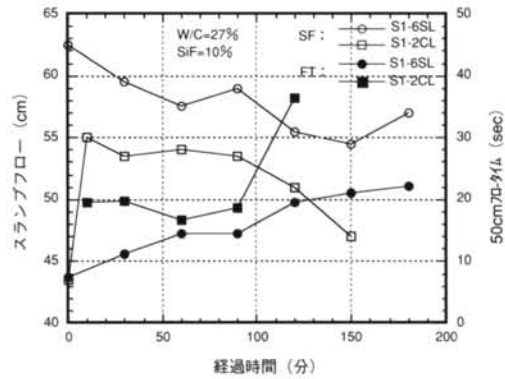


図-2 スランブフローおよび50cmフロータイムの経時変化

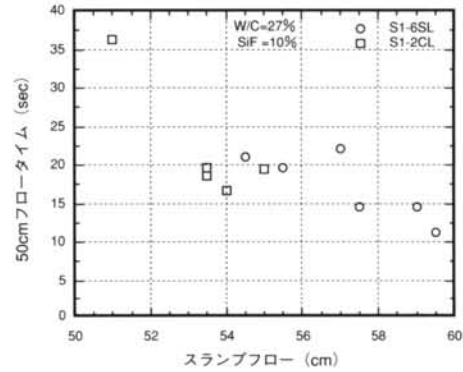


図-3 スランブフローと50cmフロータイムとの関係の例

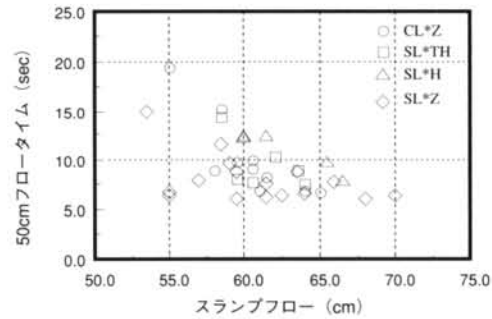


図-4 スランブフローと50cmフロータイムとの関係

ことがわかる。しかし、FT<sub>50</sub>と塑性粘度との関係からは、同じSFであればシリーズ1の方が他のシリーズに比べてFT<sub>50</sub>が小さい傾向を示すと考えられる。

## 3.1.2 フレッシュコンクリートの性質に及ぼす要因の影響

## 1) 流動特性

流動性の要因であるSFとFT<sub>50</sub>との関係を図-4に示す。FT<sub>50</sub>は、施工上の目標である5～15秒をほぼ満足している。図からSFとFT<sub>50</sub>の関係は、セメント銘柄および混和剤種類によって大差なく、(SL\*Z)以外の組合わせについては幾分相関が認められる。

セメント銘柄および混和剤種類をカテゴリ変数としてSFとFT<sub>50</sub>との相関係数を求めた結果、(CL\*Z)、(SL\*TH) および (SL\*H) の相関係数はそれぞれ  $r = 0.832$  ( $n=10$ )、 $-0.524$  ( $n=6$ ) および  $-0.949$  ( $n=5$ ) である。一般にSFとFT<sub>50</sub>の間には相関がないといわれているが、使用材料が同じで、配合条件がある範囲にあれば相関が認められる場合もある。

また、同様にセメント銘柄および混和剤種類をカテゴリ変数としてSF、FT<sub>50</sub>および配合要因について相関分析をした結果、SFと配合要因(混和剤添加量、SiF混入率、W/C、s/aおよびセメント量)との間の相関は低く、FT<sub>50</sub>では(SL\*TH)の組合わせの場合に配合要因との相関係数が0.7以上( $n=6$ )と比較的大きくなった。

各シリーズについてSFおよびFT<sub>50</sub>に及ぼす配合要因の影響についてセメント銘柄および混和剤種類をカテゴリ変数として分散分析(Scheffeの方法)をした結果、シリーズ1およびシリーズ2ではいずれの要因も有意とならず、シリーズ3ではSiF混入率が0%と3%、3%と5%、3%と10%間において1%の危険率で有意となった。この場合、SiF混入率の増加に伴ってSFは幾分小さくなるが、FT<sub>50</sub>も小さくなりコンクリートの流動性は改善できる。ただし、SiF混入率が0%の配合では混和剤添加量が約0.1%少ないため同一添加量とした場合にはSFは幾分大きくなる。なお、シリーズ3ではシリーズ2の関連するデータを分析に用い、以後の分析でも同様に関連するデータはすべて用いるものとする。

SFおよびFT<sub>50</sub>とレオロジー定数との関係では、一般にSFと降伏値およびFT<sub>50</sub>と塑性粘度との相関が強いと言われている。しかし、本研究では、SFについては相関は認められず、FT<sub>50</sub>は、図-5に示すように(CL\*Z)、(SL\*TH)の組合わせで相関係数  $r = 0.877$  ( $n=7$ ) および  $0.577$  ( $n=6$ ) であった。

## 2) 分離特性

材料分離を示す指標であるSIとW/CおよびSiF混入率との関係を図-6および図-7に示す。SIは、W/Cが24%以上では3～9%と大差ないが、粉体量が約740kg/m<sup>3</sup>のW/Cが21%の配合ではCLおよびSLと

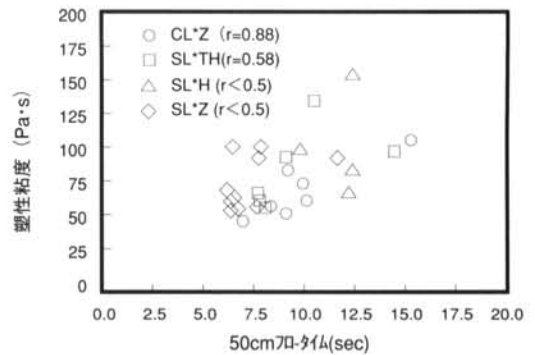


図-5 50cm フロータイムと塑性粘度との関係

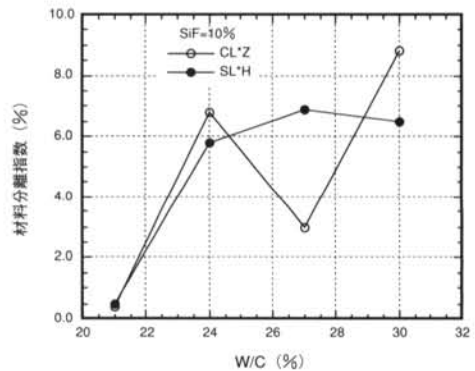


図-6 材料分離に及ぼす W/C の影響

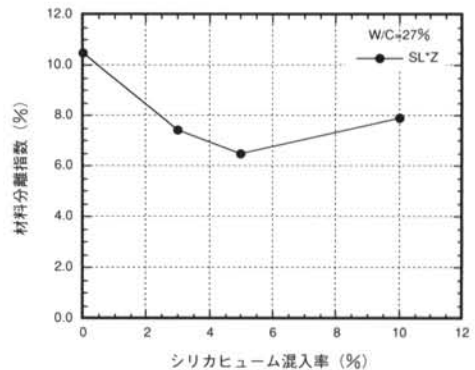


図-7 材料分離に及ぼす SiF 混入率の影響

もにはほぼ0%で、これは粉体量の増加によるものと考える。SIに及ぼすW/Cの影響について分散分析した結果、SIはW/C=21%と24および30%間においてFisherの方法では5%の危険率で有意となった。さらに、W/Cが24%以上ではSIの差が小さいことからこれらを一つのグループとしてW/C=21%とそれ以外の

W/Cについて分散分析した結果、FisherおよびScheffeの方法では1%の危険率で有意となった。このように粉体量が約700kg/m<sup>3</sup>を超える配合では材料分離が生じにくい傾向が認められる。また、SiF混入率とSIの関係についてみると、SiFの混入率ではなくSiFが混入されているかどうかによって異なる傾向が認められる。

载荷2分後の加圧ブリーディング量は、シリーズ1のCLでは0.0～0.4ccで、ほとんどブリーディングが生じない。また、SiFを混入したコンクリートは、増粘剤を混入したW/Cが28%のコンクリート<sup>10)</sup>と比較しても加圧ブリーディング量は少ない。このようにW/Cが30%以下で、SiFを混入したコンクリートではとくにブリーディング量は少ない傾向が認められた。

### 3) 充てん性

充てん性は、VロートおよびBOX充てん性(以下、充てん高さ)で評価する。セメント銘柄および混和剤種類をカテゴリ変数としてVロートと配合要因について相関分析をした結果、シリーズ3のSiF混入率を要因とした(SL\*TH)を除いていずれの組合わせともに相関係数は0.6以上と比較的高く、さらに(CL\*Z)、(SL\*H)では相関係数は0.8以上と高い傾向が認められた。相関係数の符号からVロートは、混和剤添加量が多いほど、W/Cおよびs/aが小さいほど、セメント量が多いほど大きい傾向を示す。とくに、混和剤添加量が多くなればコンクリートが分離傾向を示すことから流下時間も大きくなるものと考えられる。その他の3要因はコンクリートの粘性に起因し、粘性の増加にともないVロートが大きくなるようである。

各シリーズのVロートに及ぼす配合要因の影響について分散分析(Scheffeの方法)をした結果、シリーズ1ではW/Cが21%と30%が5%の危険率で、シリーズ2では混和剤種類がTHとH、HとZ、W/Cが21%と24%、21%と27%、21%と30%、シリーズ3ではSiF混入率が0%と3%、0%と10%、3%と5%、3%と10%間において1%の危険率で有意となった。これらのことから充てん性の一つの評価指標であるVロートは、W/Cが小さくなれば粘性の増加にともない大きくなり、また混和剤の種類により異なり、さらにSiFの混入によって小さくなることからわかる。

充てん高さと配合要因との関係では、Vロートと異なり(SL\*TH)はすべての配合要因との相関係数が $|r| > 0.8$ 、(CL\*Z)はW/C、s/a、Cとの相関係数が $|r| > 0.8$ と大きい。

各シリーズについて充てん高さに及ぼす配合要因

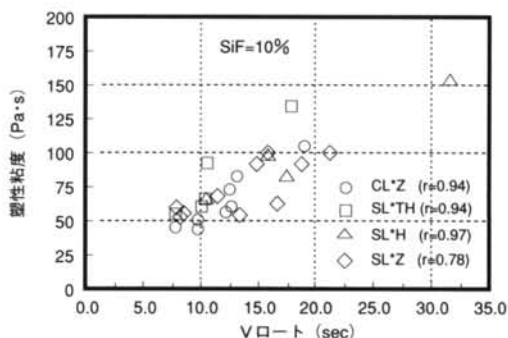


図-8 塑性粘度とVロートとの関係

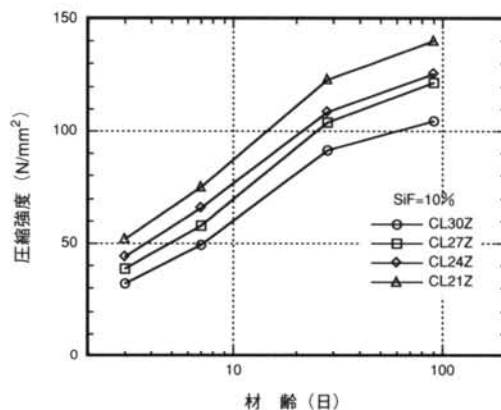


図-9 圧縮強度の経時変化 (CL)

の影響について分散分析(Scheffeの方法)をした結果、シリーズ1およびシリーズ2ではいずれの要因も有意とならず、シリーズ3ではSiF混入率が0%と3%、3%と5%、3%と10%間において5%の危険率で有意となった。なお、BOX充てん高さの測定値は、粗骨材量が900kg/m<sup>3</sup>程度のコンクリートでは粗骨材のわずかなかみ合いにより閉塞するため骨材粒度のばらつきの影響が大きいことが考えられる。また、文献11)では粗骨材量が340 l/m<sup>3</sup>程度では充てん高さは、約15cm以下で、本試験結果に比べて小さい傾向を示している。すなわち、本試験ではSiFを混入しているために充てん高さが大きくなったと考えられる。

Vロートおよび充てん高さとレオロジー定数との関係を見る。Vロートと塑性粘度との関係は図-8に示すようにいずれの場合にも相関係数が約0.8以上、(SL\*Z)を除けば約0.95以上の高い相関を示している。これに対して充てん高さと降伏値との相関係数は、(SL\*Z)を除いて0.58～0.81と比較的高い

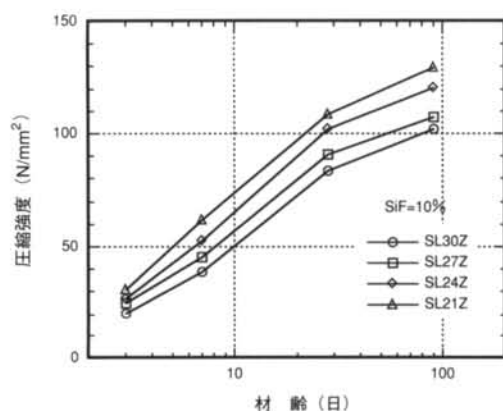


図-10 圧縮強度の経時変化 (SL)

値を示している。これらのことからVロートのある値にコントロールする場合にはコンクリートの粘性をコントロールすればよいことがわかる。

### 3.2 硬化コンクリート

#### 3.2.1 力学特性

##### 1) 圧縮強度

シリーズ1の圧縮強度の経時変化の一例を図-9および図-10に示す。なお、図中の記号は、順に最初の2文字がセメント銘柄、次がW/C、5文字目が混和剤種類で、SiF混入率は10%である。

材齢91日においてシリーズ1では、CLはW/C=30%で約105N/mm²、21%で約140N/mm²の圧縮強度を示している。SLは、CLに比べて各W/Cともに約5~10N/mm²圧縮強度が小さい。このようにセメント銘柄によって幾分強度発現は異なる。しかし、超高強度コンクリートでは、わずかなコンクリートの品質の違い(空気量など)、供試体の状態などの影響を受けやすいので試験結果の評価にはこれらの影響によるばらつきも合わせて考慮しておく必要がある。

次に混和剤種類にZおよびHを用いた場合の強度発現状況の例を図-11に示す。図では混和剤種類によって幾分混和剤Hの方が強度が大きい傾向にある。しかし、セメント銘柄を考慮せずに分散分析(Scheffeの方法)をした結果、混和剤種類は強度に対して有意にならなかった。後述のように混和剤Zを用いた場合、セメント銘柄による差が有意であることから混和剤ZおよびHでは、セメント銘柄による差がばらつきとなるため強度発現に差がでなかったと予想できる。

W/Cおよびセメント銘柄が圧縮強度の伸びに及ぼ

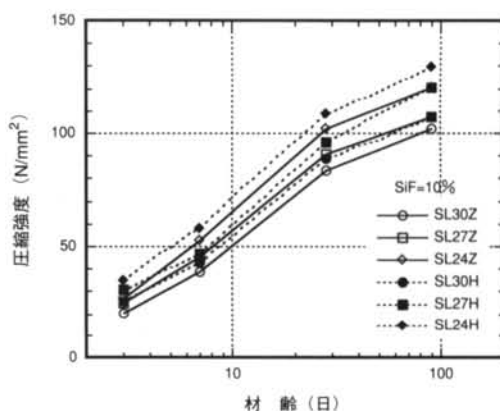


図-11 圧縮強度に及ぼす混和剤種類の影響

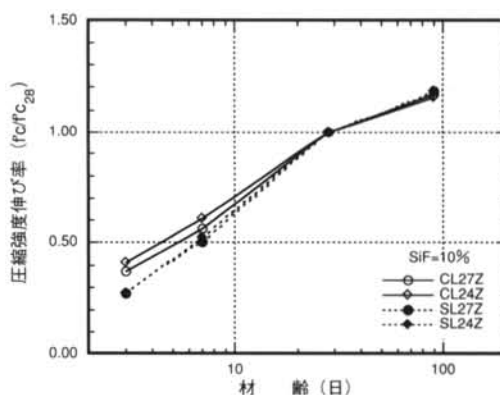


図-12 圧縮強度伸び率の一例

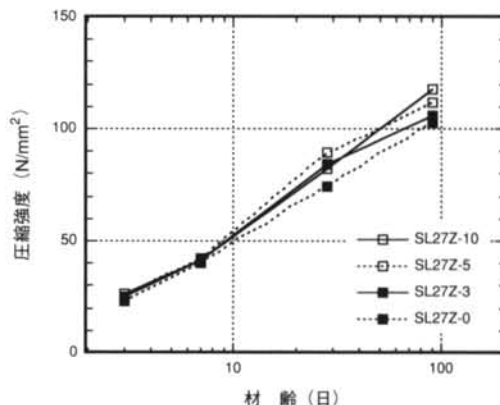


図-13 圧縮強度に及ぼすSiF混入率の影響

す影響について図-12に示す。シリーズ1においては、同じセメント銘柄ではW/Cによる圧縮強度伸びの差は小さいが、初期材齢における強度発現はセメ



| セメント種類 | 回帰式             | $r^2$ |
|--------|-----------------|-------|
| CL     | $32.9+22.58C/W$ | 0.93  |
| SL     | $34.6+20.13C/W$ | 0.98  |

表-11 圧縮強度（材齢91日）の回帰結果

ント銘柄、W/Cによって幾分差がある。材齢91日では強度伸び率は小さくなり、セメント銘柄による差も小さい。このように圧縮強度が約100N/mm<sup>2</sup>を超える領域では、圧縮強度の伸びと材齢との関係は、約100N/mm<sup>2</sup>以下のコンクリートがほぼ直線的であるのに比べて骨材強度などの影響も受けて直線的でなくなる傾向が認められる。

セメント銘柄SLおよび混和剤Zを用いた場合のSiF混入率が圧縮強度に及ぼす影響について図-13に示す（シリーズ2および3）。初期材齢における強度発現は、SiF混入率による差は小さいが、材齢91日ではSiF混入率が高いほど圧縮強度も大きくなっている。このようにSiF混入率が10%程度までは、混入率が大きくなるにつれてSiFのフィラー効果によってコンクリートが緻密になり、その結果圧縮強度も大きくなる傾向が認められる。

C/Wと圧縮強度との関係を図-14に示す。C/Wと圧縮強度との関係は、一部を除いてほぼ直線と与えられ、これまでの知見と同じ傾向を示している。材齢91日では、圧縮強度が100N/mm<sup>2</sup>を超えており、前述のようなばらつきの影響などからC/Wと圧縮強度との関係が直線になっていないと考えられる。材齢91日ではセメント銘柄によって同じW/CでCLの方が約10N/mm<sup>2</sup>大きい。このようにセメント銘柄によってC/Wの関係が異なるので注意が必要である。材齢91日の圧縮強度をC/Wで回帰した結果を表-11に示す。回帰の寄与率は、 $r^2 \geq 0.93$ と非常に大きく、回帰精度は高い。回帰結果からは、セメント銘柄によって $f_c$ とC/Wとの関係が異なり、C/Wが約3.5～4.5の範囲ではCLの圧縮強度が約10N/mm<sup>2</sup>大きい。

また、混和剤にZを用いた配合について、セメント銘柄、W/C、材齢をカテゴリ変数として圧縮強度について分散分析（Scheffeの方法）をした結果、主効果はW/Cが21%と24%間において5%の危険率で、その他のW/Cの組合せ、セメント銘柄、材齢はすべて危険率1%で有意となった。W/Cとセメント銘柄および材齢との間の交互作用が5%の危険率で有意となり、セメント銘柄はW/C=24%において差が大きい傾向が認められた。

## 2) 引張強度

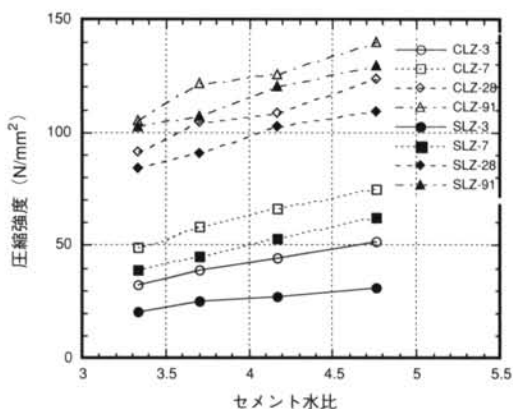


図-14 圧縮強度とC/Wとの関係

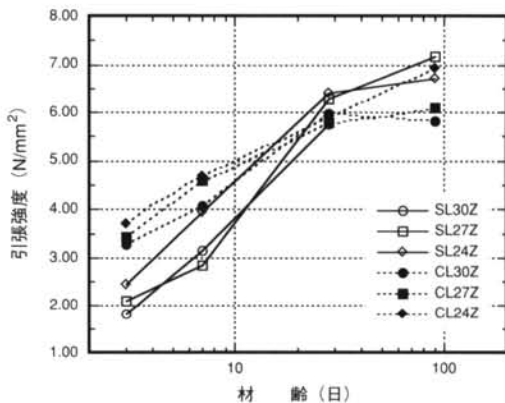


図-15 引張強度の経時変化

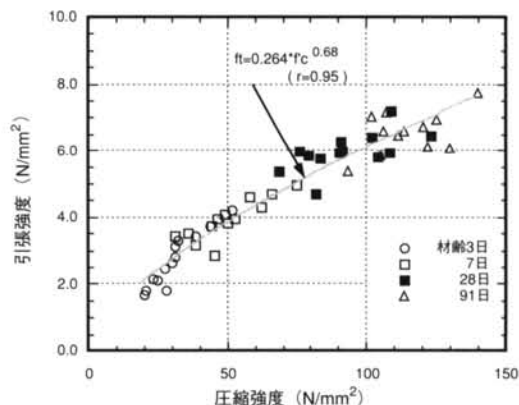


図-16 引張強度と圧縮強度との関係

引張強度の経時変化を図-15に、引張強度と圧縮強度との関係を図-16に示す。なお、図中に引張強度と圧縮強度との回帰式を示す。引張強度は、材齢91日で約6～8N/mm<sup>2</sup>と大きな値を示しているが、ばら



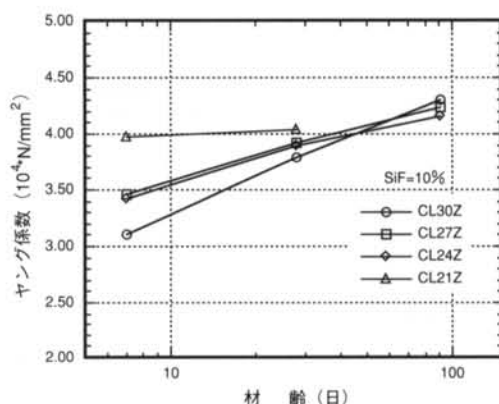


図-17 ヤング係数の経時変化

つきが比較的大きい。これは、引張強度が試験体の欠陥の影響などを受けやすく、たとえば試験体作成時の気泡の巻き込みなどにより欠陥が生じ、これらによって強度が比較的大きく変動したことが考えられる。引張強度と圧縮強度との関係は、従来の高強度コンクリートと大差ないようである<sup>12)</sup>。

### 3) ヤング係数

ヤング係数の経時変化を図-17に、ヤング係数と圧縮強度との関係を図-18に示す。ヤング係数は、 $W/C=21\%$ 以外は材齢とともに増加しているが、 $21\%$ の場合には材齢に関係なくほぼ一定である。ただし、 $W/C=21\%$ の材齢91日での結果は、幾分低下しており、試験時のトラブルの影響が考えられたので除外した。いずれにしても超高強度コンクリートの場合には初期材齢から強度が大きいためにヤング係数も大きくなる。その結果、図-17のように材齢による変化が小さくなる。

ヤング係数と圧縮強度との関係は、圧縮強度が約 $100\text{N/mm}^2$ 以上では増加が少なく、ヤング係数が骨材の品質の影響を受けていることが考えられる。今回使用した骨材ではヤング係数の上限は $40.0 \sim 45.0 \text{ kN/mm}^2$ 程度であると推測できる。

### 3.2.3 乾燥収縮特性

乾燥収縮の経時変化を図-19に、重量変化の経時変化を図-20に示す。材齢7日まで水中養生し、その後恒温室(室温 $20^\circ\text{C}$ 、湿度 $60\%$ )にて保管・測定した。なお、図中にSiFを混入していない配合例を併記した<sup>9)</sup>。

SiFの混入の有無により乾燥収縮に差はあるが、 $W/C$ による差はない。これは、SiFを混入することによって自己収縮が大きくなることによると考えられ

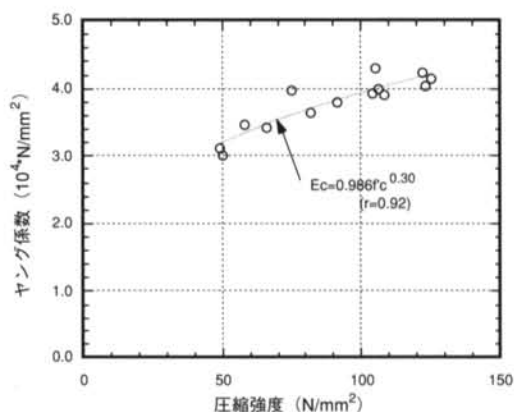


図-18 ヤング係数と圧縮強度との関係

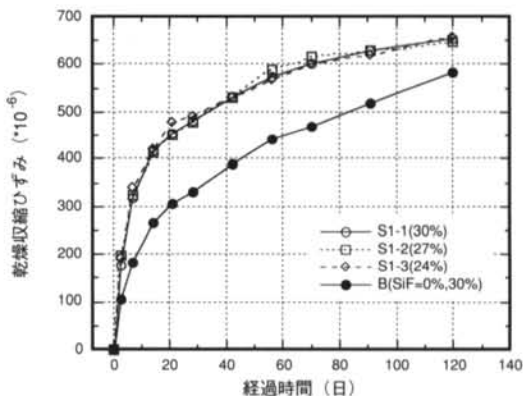


図-19 乾燥収縮ひずみの経時変化

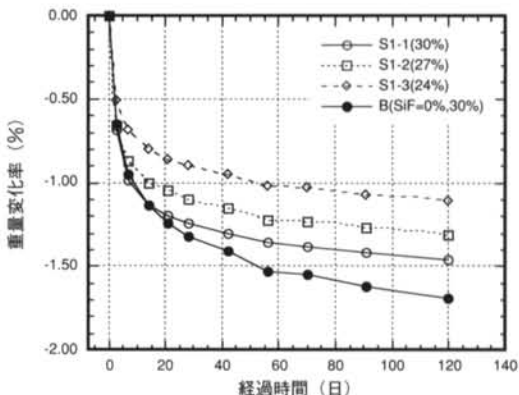


図-20 重量変化の経時変化

る。また、普通ポルトランドセメントを用いた通常のコンクリート<sup>13)</sup>に比べても本試験結果の方が幾分小さい。これらから、低熱ポルトランドセメントを用

い、W/Cが異なっても単位水量および混和材混入率が同じであれば乾燥収縮量は大きな差がないことがわかる。なお、SiF混入率については本試験では検討していないが、SiF混入率による影響も推測できる。

重量変化は、SiFの未混入の方が混入したものより大きく、SiFを混入したものではW/Cが小さいほど小さくなっている。また、材齢20日ごろから重量変化曲線は水平に近づいている。このように重量変化が、W/Cに大きく影響されるのはコンクリート中の水分がどの程度あるか、すなわち水和反応がどの程度進行し、練混ぜ水がどの程度水和反応で消費されたか、また、コンクリートの緻密さによる水分の拡散の程度、すなわち圧縮強度、SiFの混入量の影響を受けると推測できる。

### 3.3 熱的特性

コンクリート温度の測定結果の一例を図-21に示す。なお、参考にSiFを混入しないセメント量がほぼ等しい配合(W/C=28.2%, C=550kg/m<sup>3</sup>)の断熱温度上昇量<sup>9)</sup>も併記した。

断熱温度上昇量の経時変化からCLとSLでは、セメント量が同じであれば発熱速度はC<sub>2</sub>Sの多いSLの方が遅い傾向にあり、終局断熱温度上昇量は、いずれのセメントでも約50～55℃と比較的差は小さい。また、それぞれのセメント銘柄で温度上昇開始はSiFを混入したほうが遅く、初期の温度上昇速度は幾分速い傾向にある。終局断熱温度上昇量は、SiFを混入したほうが小さく、未混入のものは材齢12日でも幾分温度上昇している。しかし、SiFを混入した配合では、SLおよびCLともに材齢6日ではほぼ温度上昇速度は0に近づいているが、CLはその後もわずかに温度上昇している。なお、このように温度上昇速度が遅くなれば、装置の制御上の誤差の影響を受ける場合がある。

### <参考文献>

- 1) 木村克彦, 他: “実大壁による高強度地中連続壁に関する実験的研究” 土木学会論文集第397号/VI-9, 1988.9, pp143～150
- 2) 中村修, 他: “高強度地中連続壁による大空間の施工—14万KL LNG地下タンク工事—” 土木学会第8回施工体験発表会, 1989.2, pp73～82
- 3) 坂田昇, 他: “高性能地下連続壁のコンクリート配合に関する実験的研究” コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, 1994, pp.213～218
- 4) 三浦律彦, 他: “高ピーライトセメントの高強度地下連続壁コンクリートへの適用性に関する基礎的研究” コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, 1994, pp.271～276
- 5) 鍋木孝治, 他: “高強度・高流動コンクリートの地下連続壁への適用—フレッシュコンクリートの性質—” 土木学会第50回年次学術講演会講演集V, 1995.9, pp1152～1153
- 6) 日本建築学会 “高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説” p.137

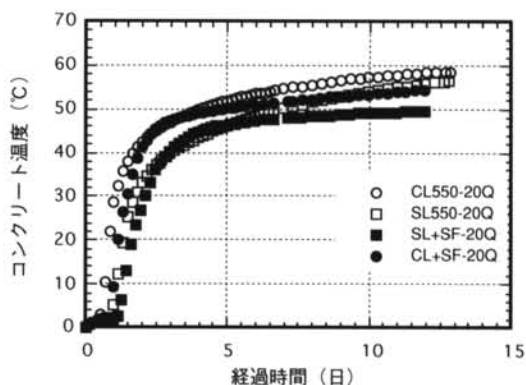


図-21 断熱温度上昇量の経時変化

## §4. 結論

本研究では地中連続壁の施工に適した超高強度コンクリートのフレッシュコンクリート、硬化コンクリートの物性および熱特性に及ぼす影響について検討した。その主な結果を以下に示す。

(1) 地中連続壁の施工性を満足するSiFを混入した超高強度コンクリートの物性に及ぼす要因の影響を明らかにした。

(2) SiFを混入したコンクリートは、塑性粘度を未混入のものに比べて小さくできるなど地中連続壁の施工性を向上できる。

(3) 材齢91日での圧縮強度は、SiFを混入することにより最大142N/mm<sup>2</sup>と目標強度を満足した。

(4) 圧縮強度が100～120N/mm<sup>2</sup>のコンクリートの断熱温度上昇量は、SiFを混入することによって約50～55℃と小さくできた。

- 7) 土木学会コンクリート技術シリーズ No.15 “高流動コンクリートに関する技術の現状と課題”，pp.10～13
- 8) 河井徹，他：“流動コンクリートのレオロジー特性に関する基礎的研究”コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，1994，pp.125～130
- 9) 社内資料，1997.3
- 10) 瀬戸謙一郎，他：“高強度コンクリートの加圧ブリーディング性状に及ぼす配合条件の影響”土木学会第50回年次学術講演会講演集V，1995.9，pp1012～1013
- 11) 万木正弘，他：“コンクリートの配合設計に関する研究”鹿島建設技術研究所報第42号，1994.10，pp23～28
- 12) 木村克彦：“地中連続壁の温度ひびわれ制御に関する研究”名工大学位論文，1991.3
- 13) 文献5) P58

