

# 論文 コンクリートの明度及び長さ変化に及ぼす混和材の影響

長谷川 聖史\*1・小林 崇\*2・若林 正憲\*3・伊達 重之\*4

**要旨**：コンクリートの明度ならびに長さ変化に及ぼす混和材の種類，添加量，および養生条件の影響を材齢1年または2年において評価した。その結果，明度においては養生温度が高くなるほど，また，水中養生期間が長くなるほど高い数値を示し，その影響は材齢1年経過時点でも残存していることがわかった。また，長さ変化においては養生温度が高いほど小さくなる傾向を示すことが確認された。また，強度に及ぼす影響についても評価した結果，材齢初期における水中養生の影響は，わずか1日でも有意であることがわかった。

**キーワード**：蒸気養生コンクリート，高炉スラグ微粉末，石灰石微粉末，明度，長さ変化

## 1. はじめに

コンクリート製品工場においては，生産効率の向上を目的とした蒸気養生プロセスが広く採用されている。この促進養生を利用して，コンクリートの初期強度発現を早めて脱型時間を短縮し，型枠を1日3サイクルで使用している工場も少なくない。また，プレキャストコンクリート製品においても，自己充填コンクリートが活用される事例が増えてきており，コンクリートの配合としては，材料分離抵抗性を高めるための粉体量が多くなることから，水和熱の低減や流動性の改善などを目的として高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末などの無機質微粉材料を添加する場合が多い。

一方，コンクリートに求められる品質として，強度や耐久性は重要な項目であるが，近年では美観の観点からコンクリート表面の明度についても要求特性として関心が高まっている。

しかしながら，高炉スラグや石灰石微粉末を用いたコンクリートの養生条件（養生温度や水中養生期間）と表面の明度の関係については，研究事例が少ないのが現状である。

そこで本研究では，コンクリート表面の明度，ならびに初期強度や長さ変化に及ぼす養生温度，混和材の種類と添加量および脱型直後の水中養生の影響を調査することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本実験に使用した材料を表-1に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを用いた。混和材については高炉スラグ微粉末（比表面積4000cm<sup>2</sup>/g，以降“BFS”と記す）および石灰石微粉末（比表面積2600cm<sup>2</sup>/g，以降“LP”と記す）を用いた。

表-1 使用材料

| 材料   | 種類           | 記号  | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------|--------------|-----|-------------------------|
| セメント | 早強ポルトランドセメント | C   | 3.14                    |
| 混和材  | 高炉スラグ微粉末     | BFS | 2.88                    |
|      | 石灰石微粉末       | LP  | 2.72                    |
| 細骨材  | 茨城県産陸砂       | S   | 2.62                    |
| 粗骨材  | 茨城県産碎石       | G   | 2.65                    |
| 混和剤  | ナフタレン系減水剤    | SP  | —                       |

\*1 石川島建材工業(株)技術研究所 (正会員)

\*2 ピーシー橋梁(株)試験センター

\*3 石川島建材工業(株)セグメント技術部

\*4 石川島建材工業(株)技術研究所 課長代理 (正会員)

## 2.2 配合および養生条件

実験要因と水準を表-2に、配合および養生条件を表-3に示す。各配合の単位粉体量は420kg/m<sup>3</sup> (W/P=32.1%)とした。混和材の添加方法は内割および外割とし、添加量はそれぞれ0, 50, 100kg/m<sup>3</sup>の3水準とした。また、細骨材率ならびに単位水量は、すべて41.0%ならびに135kg/m<sup>3</sup>とした。

養生条件については、前置き1時間ののち、所定の温度(40, 55℃)で6時間蒸気養生を行った。打設後7時間経過時点で20℃-65%RHの気中養生に切り替えた。ただし、20℃のケースについては打設直後から雰囲気湿度65%RHの気中養生とした。打設から18時間経過後、所定の期間(0, 1, 3日)20℃水中養生を行ったの

表-2 実験要因と水準

| 実験要因                       | 水準 |    |     |
|----------------------------|----|----|-----|
|                            | 0  | 50 | 100 |
| 混和材添加量(kg/m <sup>3</sup> ) | 0  | 50 | 100 |
| 養生温度(℃)                    | 20 | 40 | 55  |
| 水中養生期間(日)                  | 0  | 1  | 3   |

表-3 配合・養生条件

| No. | 添加方法 | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |      | 養生温度(℃) | 水中養生(日) |
|-----|------|-------------------------|-----|-----|-----|------|---------|---------|
|     |      | C                       | BFS | LP  | S   | G    |         |         |
| 1   | 内割   | 420                     | 0   | 0   | 763 | 1111 | 20      | 0       |
| 2   |      | 420                     | 0   | 0   | 763 | 1111 | 40      | 1       |
| 3   |      | 420                     | 0   | 0   | 763 | 1111 | 55      | 3       |
| 4   |      | 370                     | 50  | 0   | 762 | 1109 | 20      | 3       |
| 5   |      | 370                     | 50  | 0   | 762 | 1109 | 40      | 0       |
| 6   |      | 370                     | 50  | 0   | 762 | 1109 | 55      | 1       |
| 7   |      | 320                     | 100 | 0   | 761 | 1107 | 20      | 1       |
| 8   |      | 320                     | 100 | 0   | 761 | 1107 | 40      | 3       |
| 9   |      | 320                     | 100 | 0   | 761 | 1107 | 55      | 0       |
| 10  | 外割   | 420                     | 50  | 0   | 745 | 1084 | 40      | 0       |
| 11  |      | 420                     | 50  | 0   | 745 | 1084 | 40      | 3       |
| 12  |      | 420                     | 100 | 0   | 726 | 1057 | 40      | 0       |
| 13  |      | 420                     | 100 | 0   | 726 | 1057 | 40      | 3       |
| 14  | 内割   | 370                     | 0   | 50  | 760 | 1107 | 20      | 3       |
| 15  |      | 370                     | 0   | 50  | 760 | 1107 | 40      | 0       |
| 16  |      | 370                     | 0   | 50  | 760 | 1107 | 55      | 1       |
| 17  |      | 320                     | 0   | 100 | 758 | 1103 | 20      | 1       |
| 18  |      | 320                     | 0   | 100 | 758 | 1103 | 40      | 3       |
| 19  |      | 320                     | 0   | 100 | 758 | 1103 | 55      | 0       |
| 20  | 外割   | 420                     | 0   | 50  | 743 | 1082 | 40      | 0       |
| 21  |      | 420                     | 0   | 50  | 743 | 1082 | 40      | 3       |
| 22  |      | 420                     | 0   | 100 | 723 | 1053 | 40      | 0       |
| 23  |      | 420                     | 0   | 100 | 723 | 1053 | 40      | 3       |

ち、20℃-65%RHの環境にて気中養生を行った。

## 2.3 練混ぜ

練混ぜは、60リットル強制2軸練りミキサを用いて90秒間行った。また、練上りのスランプが4±1.5cmとなるよう、減水剤の添加率を適宜調整した。

## 2.4 試験項目

試験項目を表-4に示す。圧縮強度は、JIS A 1108に準拠し、材齢7, 18時間および4週にて測定した。明度は、材齢2, 4週および1年におけるL値を測定した。長さ変化においては、JIS A 1129-2に準拠し、コンタクトゲージ法にて測定した。基長の測定のために基準とした材齢を7日とし、材齢2年に測定を行った。

通常、プレキャストコンクリート製品は、水

表-4 試験項目

| 試験項目 | 試験方法                | 試験材齢          |
|------|---------------------|---------------|
| 圧縮強度 | JIS A 1108に準拠       | 7hr, 18hr, 4週 |
| 明度   | 色彩色差計(ミルタCR300)にて測定 | 2週, 4週, 1年    |
| 長さ変化 | JIS A 1129-2に準拠     | 7日, 2年        |

表-5 実験結果

| No. | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) |      |      | L値   |      |      | 長さ変化(μ) |
|-----|--------------------------|------|------|------|------|------|---------|
|     | 7hr                      | 18hr | 4週   | 2週   | 4週   | 1年   | 2年      |
| 1   | 3.0                      | 30.1 | 61.1 | 58.7 | 57.3 | 56.2 | 149     |
| 2   | 22.8                     | 34.9 | 59.8 | 59.3 | 60.0 | 58.3 | 142     |
| 3   | 32.7                     | 34.7 | 53.4 | 64.0 | 63.6 | 65.7 | 182     |
| 4   | 0.9                      | 21.4 | 80.6 | 53.5 | 55.1 | 57.9 | 226     |
| 5   | 12.9                     | 24.8 | 48.7 | 59.3 | 59.8 | 57.0 | 319     |
| 6   | 22.6                     | 27.7 | 45.9 | 60.4 | 61.7 | 62.0 | 617     |
| 7   | 1.0                      | 18.5 | 68.7 | 53.4 | 54.2 | 56.4 | 335     |
| 8   | 8.6                      | 22.3 | 65.4 | 59.5 | 61.9 | 63.5 | 361     |
| 9   | 19.9                     | 25.9 | 36.2 | 60.9 | 61.8 | 61.9 | 370     |
| 10  | 22.9                     | 35.4 | 59.0 | 58.7 | 58.6 | 58.9 | 713     |
| 11  | 22.9                     | 35.4 | 70.3 | 59.5 | 60.4 | 60.4 | 438     |
| 12  | 23.1                     | 36.6 | 64.2 | 58.1 | 58.0 | 58.1 | 298     |
| 13  | 23.1                     | 36.6 | 76.8 | 59.0 | 60.1 | 61.1 | 327     |
| 14  | 1.2                      | 19.6 | 73.5 | 54.2 | 56.3 | 57.1 | 590     |
| 15  | 13.5                     | 21.9 | 45.9 | 60.1 | 60.4 | 59.6 | 497     |
| 16  | 22.8                     | 28.4 | 46.8 | 59.4 | 61.6 | 60.2 | 188     |
| 17  | 1.3                      | 19.0 | 64.2 | 57.0 | 58.7 | 59.9 | 184     |
| 18  | 12.6                     | 23.0 | 62.6 | 62.1 | 63.8 | 65.3 | 213     |
| 19  | 22.2                     | 22.2 | 35.0 | 62.7 | 62.1 | 62.6 | 150     |
| 20  | 23.6                     | 35.2 | 53.1 | 61.4 | 61.0 | 61.9 | 320     |
| 21  | 23.6                     | 35.2 | 65.8 | 61.7 | 62.9 | 64.2 | 496     |
| 22  | 23.0                     | 35.3 | 53.1 | 63.3 | 63.1 | 63.5 | 416     |
| 23  | 23.0                     | 35.3 | 67.5 | 63.6 | 64.9 | 65.2 | 590     |

中養生後直ちに出荷することが多いが、中には長期保管したのち出荷するケースもある。従って、品質の確認を目的に、明度ならびに長さ変化については長期材齢において測定を行った。

圧縮強度用に  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を、明度用に  $50 \times 300 \times 300\text{mm}$  の平板供試体を、長さ変化用に  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の角柱供試体を採取した。なお、締固めには 3000rpm のテーブルバイブレーターを用い、60 秒間行った。

### 3. 実験結果および考察

各配合・養生条件の実験結果を表-5に示す。

#### 3.1 圧縮強度に及ぼす影響

BFS および LP をセメントの内割で添加したコンクリートの圧縮強度に及ぼす各要因の影響について、表-5の結果を用いて解析を行った。BFS については表-5に示す No.1~9の結果を対象に、LP については No.1~3 および No.14~19の結果を対象にそれぞれ分散分析を行い、圧縮強度に及ぼす各要因の影響が有意であるかどうかの判定を行った。材齢ごとの圧縮強度に及ぼす各要因の影響について、その寄与率と判定結果を表-6に示す。同じく、各要因の効果について図-1~図-3に示す。

BFS および LP とともに、材齢 18 時間までは添加量が増加するに伴って圧縮強度は低下する傾向にあった。材齢 4 週に至ると、BFS 添加の場合は添加量にかかわらず強度低下は見られなかった（分散分析において“有意でない”と判定された）。一方、LP 添加の場合、依然として強度低下が認められるものの、その効果は材齢初期に比べて大幅に緩和されている。LP の内割添加による強度低下の抑制効果は、材齢初期ほど卓越すると報告されている<sup>1)</sup>が、蒸気養生したコンクリートの短期材齢においては逆の傾向を示した。これは、LP 添加による初期強度低下の抑制効果よりも、高温養生による水和反応の促進効果のほうが大きかったためと考えられる。

また、図-2に示すようにいずれの混和材を用いた場合においても、蒸気養生温度が高くな

表-6 圧縮強度に及ぼす各要因の影響  
(分散分析結果)

| 要因     | 寄与率(%) |      | 判定  |    |
|--------|--------|------|-----|----|
|        | BFS    | LP   | BFS | LP |
| (7時間)  |        |      |     |    |
| 添加量    | 13.3   | 9.4  | **  | ** |
| 養生温度   | 74.5   | 82.1 | **  | ** |
| (18時間) |        |      |     |    |
| 添加量    | 72.4   | 71.0 | **  | ** |
| 養生温度   | 20.9   | 13.3 | **  | ** |
| (4週)   |        |      |     |    |
| 添加量    | -      | 1.9  | -   | *  |
| 養生温度   | 64.3   | 58.6 | **  | ** |
| 水中養生期間 | 32.7   | 33.1 | **  | ** |

\*\* 危険率1%で有意 \* 危険率5%で有意

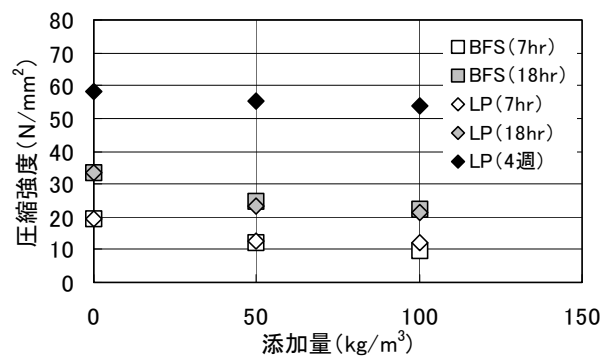


図-1 圧縮強度と混和材添加量の関係

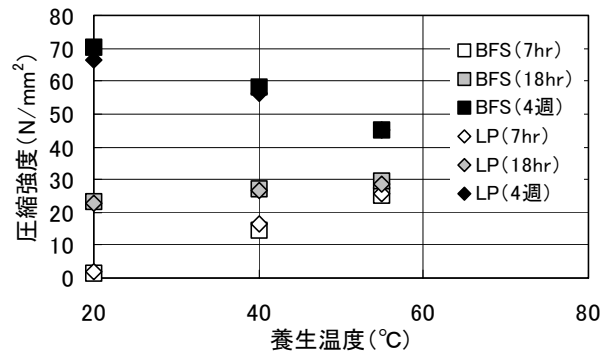


図-2 圧縮強度と養生温度の関係

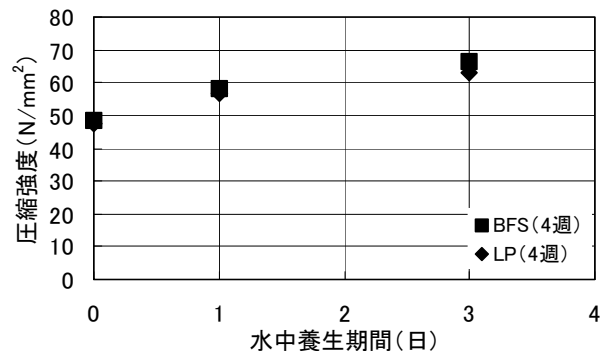


図-3 圧縮強度と水中養生の関係

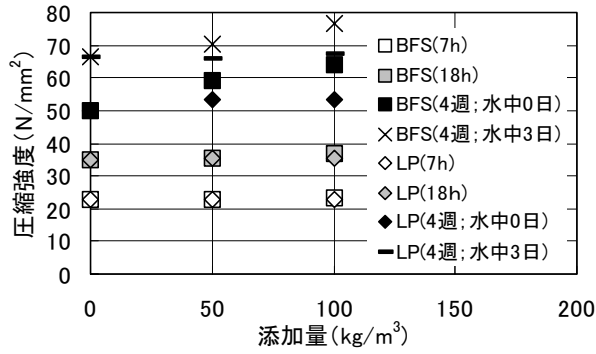


図-4 圧縮強度に及ぼす  
混和材外割添加の影響

ると初期の強度発現は大幅に改善されるが、4週強度においては逆に高温養生による強度低下が見られた。これは既往の研究<sup>2), 3)</sup>と同様、蒸気養生のように高温で水和反応させると、セメント粒子表面に形成された水和物がセメント粒子内部の水和反応を抑制するため、その後の水和反応が進みにくくなり、強度低下が見られたものと考えられる。

強度増進に及ぼす水中養生の影響は、いずれの混和材を用いた場合でも顕著に現れている(図-3参照)。全く水中養生をしなかったものに比べ、1日の養生で約1割、同じく3日で約2割程度高い値を示した。このことから、材齢初期における水中養生は、わずか1日でも圧縮強度に対して効果があることが判明した。

混和材を外割で添加したコンクリートに対して40℃の蒸気養生を行った場合の圧縮強度へ及ぼす影響を図-4に示す。一般に、BFS、LPいずれについても外割添加の場合は強度増加が期待されるが<sup>1)</sup>、今回の条件では短期材齢(18hrまで)においてはほとんど強度に影響を及ぼさないことが確認された。一方、材齢4週においては外割添加の効果が認められたものの、BFSに比べLPではその効果は微小であった。

### 3.2 明度に及ぼす影響

材齢ごとの明度に及ぼす各要因の影響について、その寄与率と判定結果を表-7に示す。各要因の効果について図-5~図-7に示す。

BFS および LP とともに、明度に及ぼす影響が

表-7 明度に及ぼす各要因の影響

(分散分析結果)

| 要因     | 寄与率(%) |      | 判定  |    |
|--------|--------|------|-----|----|
|        | BFS    | LP   | BFS | LP |
| (2週)   |        |      |     |    |
| 添加量    | 12.2   | 8.3  | **  | ** |
| 養生温度   | 65.1   | 62.6 | **  | ** |
| (4週)   |        |      |     |    |
| 養生温度   | 75.3   | 61.0 | **  | ** |
| 水中養生期間 | 5.5    | 8.4  | **  | ** |
| (1年)   |        |      |     |    |
| 添加量    | -      | 21.6 | -   | ** |
| 養生温度   | 52.4   | 34.4 | **  | ** |
| 水中養生期間 | 21.3   | 14.2 | **  | ** |

\*\* 危険率1%で有意 \* 危険率5%で有意

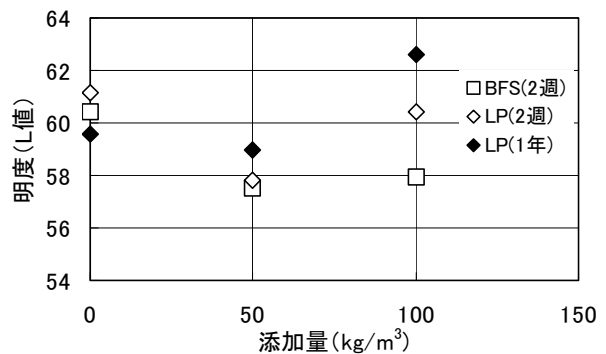


図-5 明度と混和材添加量の関係

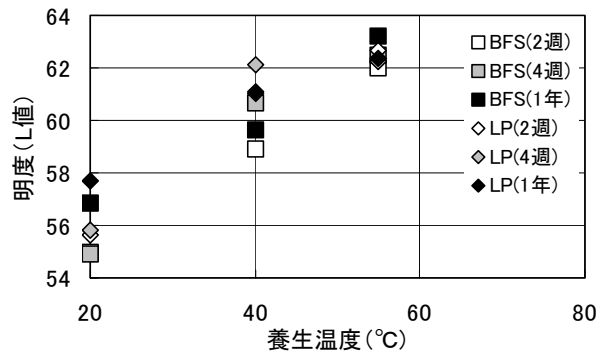


図-6 明度と養生温度の関係

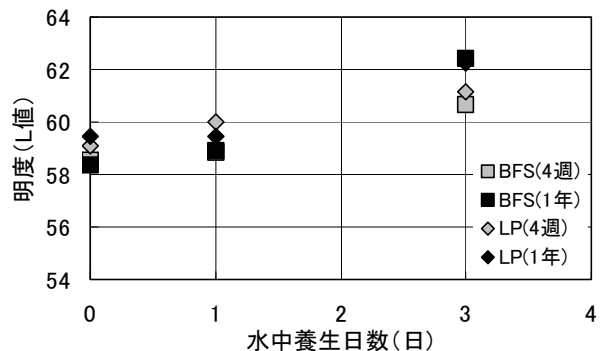


図-7 明度と水中養生の関係

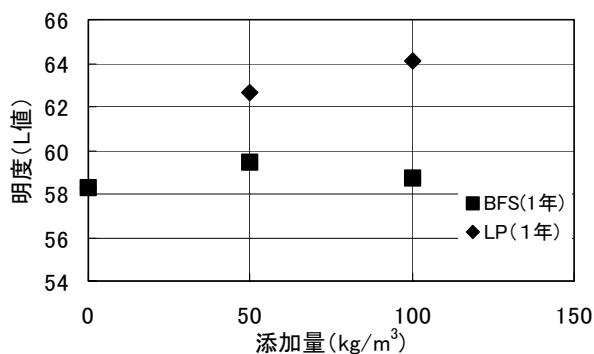


図-8 明度に及ぼす混和材外割添加の影響

最も大きい要因は蒸気養生温度であった。セメントの水和初期における高温養生は、反応形態や生成物が異なるだけでなく反応生成物の粗大化につながり、20℃の養生に較べて径の大きな細孔の割合が多い組織構造になる<sup>3)</sup>。このため、反応生成物の差異のみならず、光の乱反射によって明度が上昇(L値が増加)したものと考えられる。この養生履歴の明度への影響は、材齢1年経過した時点においても残存していることが確認された(図-6参照)。

明度に及ぼす水中養生の影響は、表-4における寄与率で比較してわかるように、材齢4週にくらべて1年経過時点の方が、相対的に影響が大きいことが確認された。このことは、表面に一旦形成された炭酸カルシウム層が材齢4週以降、時間の経過とともに風化し、多孔化したことによるものと推察される。また、より長く水中養生を施した供試体の明度が高いのは、コンクリート表面に炭酸カルシウム生成のもととなる水酸化カルシウムが多く析出することに起因するものと推察される(図-7参照)。このことから、明度に及ぼす材齢初期における水中養生の影響は、わずか1日でも有意であることがわかった。

混和材を外割で添加したコンクリートに対して40℃の蒸気養生を行った場合の明度へ及ぼす影響を図-8に示す。BFSはほとんど明度に影響しないものの、炭酸カルシウムそのものであるLPは、前述の理由から明度の上昇が比較的大きいことが確認された。

表-8 長さ変化に及ぼす各要因の影響  
(分散分析結果)

| 要因       | 寄与率(%) |      | 判定  |    |
|----------|--------|------|-----|----|
|          | BFS    | LP   | BFS | LP |
| (2年) 添加量 | 35.2   | 41.9 | **  | ** |
| 養生温度     | -      | 14.7 | -   | ** |

\*\* 危険率1%で有意 \* 危険率5%で有意

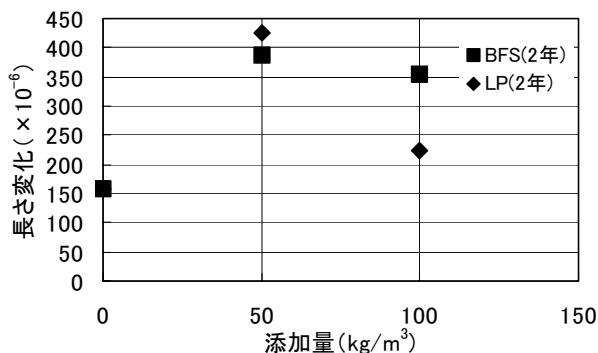


図-9 長さ変化と混和材添加量の関係

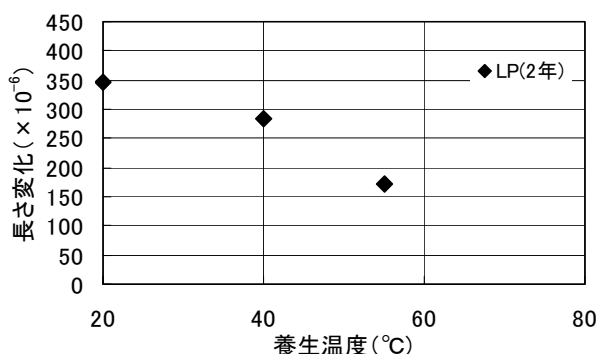


図-10 長さ変化と養生温度の関係

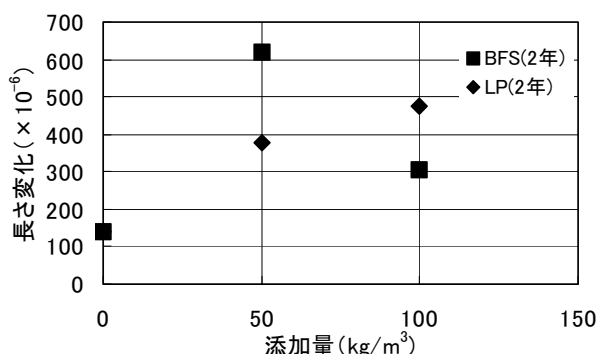


図-11 長さ変化に及ぼす  
混和材外割添加の影響

### 3.3 長さ変化に及ぼす影響

材齢2年における長さ変化に及ぼす各要因の影響について、その寄与率と判定結果を表-8

に示す。同じく、各要因の効果について図-9、図-10に示す。

材齢2年における長さ変化に及ぼす混和材添加量の影響について見てみると、添加量が増加するに伴って長さ変化量は大きくなる傾向にあった。とくに、混和材無添加から50kg/m<sup>3</sup>にかけてはBFSおよびLPの場合とも約250×10<sup>-6</sup>の増加が見られた。

また、養生温度が高くなるに伴って長さ変化量は小さくなる傾向にあった。一般に、蒸気養生を行ったセメント硬化体の細孔径は、養生温度が高くなるほど細孔半径10nm以上の細孔量が増加し、ポーラスな構造になると考えられている<sup>3)</sup>。このことから、長さ変化量は養生温度が高くなるほど増大すると考えられるが、本実験では逆の結果となった。これは、20℃養生のコンクリートよりも蒸気養生コンクリートの方が水和は充分進んでおり<sup>4)</sup>、基長の材齢である7日時点では自己収縮の一部も進んでいると考えられるため、材齢7日以降の長さ変化量が小さくなったものと考えられる。

一方、水中養生の影響は認められなかった(分散分析において“有意でない”と判定された)。これは、基長の材齢である7日以前に水中養生を行っているためと考えられる。つまり、材齢初期における水中養生の有無の影響は、材齢7日時点ですでに水和による自己収縮や乾燥収縮による長さ変化量の差に現れているため、材齢7日以降の長さ変化量に差が見られなかったものと推察される。

混和材を外割で添加したコンクリートに対して40℃の蒸気養生を行った場合の長さ変化へ及ぼす影響を図-11に示す。粉体量の増加に伴い、長さ変化は大きくなる傾向にあった。

#### 4. まとめ

コンクリート表面の明度、初期強度や長さ変化に及ぼす養生温度、混和材の種類と添加量および脱型直後の水中養生の影響を調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 高炉スラグ微粉末ならびに石灰石微粉末を内割で添加したことによる若材齢における圧縮強度の低下が認められた。
- (2) 強度増進に及ぼす水中養生の影響は、わずか1日でも効果があることがわかった。
- (3) コンクリート表面の明度は、養生温度が高いほど大きい値を示し、その影響は材齢1年経過時間でも残存していた。
- (4) 明度に及ぼす材齢初期における水中養生の影響は、3日でも有意であった。
- (5) セメントに対して外割で混和材を添加した場合は、高炉スラグ微粉末はほとんど明度に影響しないが、石灰石微粉末は明度の上昇が著しい結果となった。
- (6) 高炉スラグ微粉末ならびに石灰石微粉末を内割で添加すると、無添加の場合より長期における長さ変化量は大きくなった。
- (7) 混和材を外割で添加すると、無添加の場合より長期の長さ変化量は大きくなった。
- (8) 養生温度が高くなるに伴って長さ変化量は小さくなる傾向にあった。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム委員会報告書論文集，pp.20-21，1998
- 2) 伊藤憲雄，三橋博三，深沢俊男，桐越一紀：コンクリートの強度特性並びにひび割れ抵抗性能に及ぼす養生温度の影響，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.247-254，2002
- 3) 森本文太郎，魚本健人：初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.7，No.1，pp.153-159，1996
- 4) 仕入豊和，地濃茂雄：コンクリートの凝結効果に及ぼす温度条件(20~90℃)の影響，日本建築学会論文報告集，第293号，pp.1-9，1980