

# 超高耐久低収縮コンクリートのスラブ基盤への適用

## Application of High-Durability Low-Shrinkage Concrete for Slab Base Material

河野政典\* 松下弘幸\*\* 杉岡秀紀\*\*\* 高島草麻\*\*

### 要旨

歴史的建造物である薬師寺東塔の解体改修工事において新たにコンクリート製のスラブ基盤を構築することとなった。そのスラブ基盤に適用するコンクリートは、耐用年数が500年で乾燥収縮ひずみが $300 \times 10^{-6}$ 以下の設計仕様であり、今回、これらの仕様を満足する超高耐久低収縮コンクリートの調合を得るため、収縮低減剤と膨張材の使用量、およびそれらの組合わせを因子とした調合実験を実施した。その結果、粗骨材に石灰石砕石を使用し、収縮低減剤と膨張材を併用した調合、および収縮低減剤をセメント質量の6%添加した調合において、 $300 \times 10^{-6}$ 以下を満足し、水セメント比42%で耐用年数500年を満足するコンクリートが得られることを確認した。実験結果に基づき、収縮低減剤を3%、膨張材を $20 \text{kg/m}^3$ を併用したコンクリートをスラブ基盤に $80 \text{m}^3$ 適用した。

キーワード：超高耐久、低収縮、コンクリート、膨張材、収縮低減剤

### 1. まえがき

地球環境保護への関心が高まる中、環境負荷を低減させるため、建築物においては長期間の供用が求められつつある。鉄筋コンクリート構造物を長期間供用するためには、コンクリートの高耐久化に加えて、耐久性の低下に結びつく、ひび割れの発生を抑制することが重要である。その対策として、乾燥収縮ひずみを小さくすることが最も有効であり、日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015」（以下、「JASS5」と称す）では、計画供用期間の級が長期および超長期における乾燥収縮率を $8 \times 10^{-4}$ 以下に規定している。重要構造物や高い品質が求められる建物においては、より収縮ひずみが抑制されたコンクリートが要望され、同学会の「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御指針・施工指針（案）・同解説」（以下、「ひび割れ制御指針」と称す）においては、建物の目標性能に応じて $800 \times 10^{-6}$ 以下に加え、 $650 \times 10^{-6}$ 以下、 $500 \times 10^{-6}$ 以下の3つの仕様区分が示されている。昨今、これらの仕様区分に対応するため、材料に石灰石骨材、収縮低減剤および膨張材を組合わせて使用し、コンクリートの収縮ひずみを抑制する研究が進められ、適用事例も報告されている<sup>1)</sup>。

このようなひび割れ低減の重要性ならびに要望が高まる中、今回、歴史的建造物である薬師寺東塔の解体改修

工事において新たに構築するスラブ基盤に、耐用年数が500年で乾燥収縮ひずみが $300 \times 10^{-6}$ 以下の設計仕様を満足する超高耐久低収縮コンクリートを適用した。適用に当たり、これらの設計仕様を満足するコンクリート調合を決定するための調合実験を実施した。本報では、調合実験、および実工事への適用の概要について報告する。なお、一連の実験、および工事への適用は「国宝薬師寺東塔高耐久基盤形成工事」の事業において実施したものである。

### 2. 調合実験

#### 2.1 実験計画

調合実験の因子は、収縮低減剤と膨張材の使用量とした。使用量の水準と試験体の組合わせを表-1に示す。なお、粗骨材には収縮ひずみの低減効果が見込める石灰石砕石を100%の混入率で用いる計画とした。

使用材料を表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。セメントには、膨張材との組合わせで、普通ポルトランドセメントより膨張ひずみが大きいと報告されている中庸熱ポルトランドセメントを用いた<sup>2)</sup>。膨張材、収縮低減剤を使用しないSR0E00をベース調合とし、膨張材は、SR0E00のセメントの外割りで混入した。

水セメント比については、設計耐用年数500年を満足する中性化の抵抗性が得られる水セメント比を算出し、

\*技術研究所建築研究グループ \*\*西日本支社建築工務部 \*\*\*西日本支社ビルライフケア部

表一 試験体の組合わせ

| 記号     | 粗骨材<br>石灰石<br>100% | 収縮低減剤の<br>添加率 (Cx%)* |   |   | 膨張材の混入量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |    |    |
|--------|--------------------|----------------------|---|---|---------------------------------|----|----|
|        |                    | 0                    | 3 | 6 | 0                               | 20 | 25 |
| SR0E00 | ○                  | ○                    |   |   | ○                               |    |    |
| SR3E00 | ○                  |                      | ○ |   | ○                               |    |    |
| SR6E00 | ○                  |                      |   | ○ | ○                               |    |    |
| SR3E20 | ○                  |                      | ○ |   |                                 | ○  |    |
| SR6E20 | ○                  |                      |   | ○ |                                 | ○  |    |
| SR6E25 | ○                  |                      |   | ○ |                                 |    | ○  |

\*収縮低減剤添加率：セメント質量割合

設定した。適用対象部材であるスラブ基盤の設計かぶり厚さ 50mm の条件で、中性化の進行予測を「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計指針・同解説」<sup>3)</sup> に準じて行い、水セメント比を 44%以下とした。実工事においてコンクリートを供給する予定である生コン工場の標準配合を調査し、44%以下の条件を満足する配合から水セメント比 42%を採用した。

調査実験では、容量 55 リットルの強制二軸練りミキサーを用い、練上がりの目標スランプおよび空気量は 21 ± 2.0cm、4.5 ± 1.5%とした。

## 2.2 試験項目

試験項目と方法を表一 4 に示す。乾燥収縮ひずみの測定については、膨張材を用いた SR3E20 では JIS A 6202 附属書 2、それ以外の調査では JIS A 1129 による測定を実施した。乾燥収縮ひずみの評価は、乾燥材齢 26 週の値により行うこととした。ただし、膨張材を用いたコンクリートについては、JIS A 6202 で測定された膨張ひずみが生じ、その後、JIS A 1129 により測定された乾燥収縮ひずみが生じるものとして評価した。すなわち、式(1)に示すように JIS A 1129 で測定された乾燥収縮ひずみに、膨張ひずみ分を加えたひずみを膨張材コンクリートの乾燥収縮ひずみとした。SR3E20 の乾燥材齢 26 週の収縮ひずみは、SR3E00 の乾燥材齢 26 週のひずみに SR3E20 の膨張ひずみを加えた値、SR6E20 と SR6E25 は、SR6E00 の乾燥収縮ひずみにそれぞれの膨張ひずみを加えた値とした。

$$ex \ \epsilon_{ds} = \epsilon_{1129} - ex \ \epsilon_{6202} \quad (1)$$

$ex \ \epsilon_{ds}$  : 膨張材コンクリートの乾燥収縮ひずみ

$\epsilon_{1129}$  : JIS A 1129 による乾燥収縮ひずみの測定値

$ex \ \epsilon_{6202}$  : JIS A 6202 による材齢 7 日の膨張ひずみの測定値

耐用年数 500 年の対応確認は、促進中性化試験による促進中性化速度により行うこととした。屋内の炭酸ガス濃度を 0.1%と仮定し、かぶり厚さ 50mm に対して鉄筋

表一 2 使用材料

|      |   |
|------|---|
| セメント | C 中庸熱ポルトランドセメント：密度 3.21                       |
| 混和材  | Ex 膨張材(エトリンガイト・石灰複合系)：密度 3.10                 |
| 細骨材  | S 山砂：京都府城陽産 密度：2.56 F.M.：2.80                 |
| 粗骨材  | G 石灰石碎石 2005：いなべ市藤原町東禅寺産<br>密度：2.69 F.M.：6.70 |
| 混和剤  | SP 高性能 AE 減水剤：ポリカルボン酸系<br>SR 収縮低減剤            |

表一 3 コンクリートの調査

|        | W/C (%) | S/a (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |     | 混和剤 (Cx%) |     |
|--------|---------|---------|--------------------------|-----|----|-----|-----|-----------|-----|
|        |         |         | W                        | C   | Ex | S   | G   | SP        | SR  |
| SR0E00 | 42      | 53.0    | 170                      | 405 | 0  | 893 | 834 | 0.7       | 0   |
| SR3E00 | 42      | 53.0    | 170                      | 405 | 0  | 893 | 834 | 0.7       | 3.0 |
| SR6E00 | 42      | 53.0    | 170                      | 405 | 0  | 893 | 834 | 0.7       | 6.0 |
| SR3E20 | 42      | 52.5    | 170                      | 405 | 20 | 876 | 834 | 0.7       | 3.0 |
| SR6E20 | 42      | 52.5    | 170                      | 405 | 20 | 876 | 834 | 0.7       | 6.0 |
| SR6E25 | 42      | 52.4    | 170                      | 405 | 25 | 872 | 834 | 0.7       | 6.0 |

表一 4 試験項目と方法

| 項目       | 方法                                      |
|----------|---|
| スランプ     | JIS A 1101                              |
| 空気量      | JIS A 1128                              |
| コンクリート温度 | JIS A 1156                              |
| 圧縮強度     | JIS A 1108 標準養生 1, 4, 13 週              |
| 長さ変化     | 乾燥収縮試験<br>[調査 SR0E00, SR3E00, SR6E00]   |
|          | 拘束膨張収縮試験<br>[調査 SR3E20, SR6E20, SR6E25] |
| 促進中性化    | JIS A 1153 [調査 SR6E20 を除く]              |

表一 5 フレッシュコンクリートの試験結果

|        | スランプ (cm) | スランプフロー (mm) | 空気量 (%) | コンクリート温度 (°C) |
|--------|-----------|--------------|---------|---------------|
| SR0E00 | 22.0      | 38.8 × 36.7  | 4.4     | 21            |
| SR3E00 | 23.0      | 47.0 × 43.5  | 3.5     | 21            |
| SR6E00 | 19.0      | 32.5 × 31.5  | 3.5     | 21            |
| SR3E20 | 23.0      | 45.0 × 42.0  | 3.0     | 21            |
| SR6E20 | 21.5      | 34.8 × 34.0  | 3.0     | 20            |
| SR6E25 | 21.5      | 34.5 × 34.5  | 3.4     | 21            |

腐食確率 3%以下を満足する 500 年の平均中性化深さを 30mm とすると、促進中性化試験における中性化速度係数の上限は 1.32mm/√週となる<sup>3)</sup>。したがって、それ以下であれば耐用年数 500 年を満足するものと判断した。

## 2.3 実験結果

### a. フレッシュコンクリートおよび圧縮強度

フレッシュコンクリートの試験結果を表一 5 に示す。スランプ、空気量とも目標値を満足する結果であったが、

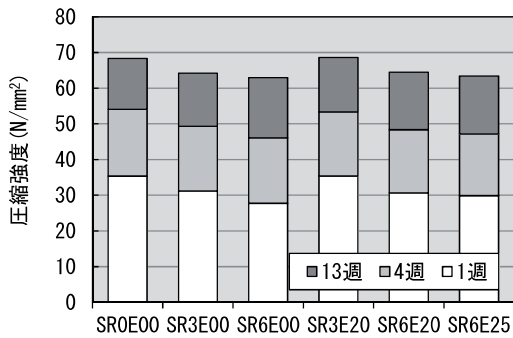


図-1 圧縮強度の試験結果

収縮低減剤を用いた調合は空気量がやや小さい傾向にあった。

圧縮強度の試験結果を図-1に、ベース調合となるSR0E00の圧縮強度に対する比として、収縮低減剤の影響を図-2に、膨張材の影響を図-3に示す。図-2に示すように、収縮低減剤の添加により圧縮強度が低下するが、材齢の経過とともにその低下率は小さくなり、既往文献と同様の傾向を示した<sup>4)</sup>。膨張材については、セメントの外割り混入としたため、20kg/m<sup>3</sup>の混入では強度増進がみられたが、25kg/m<sup>3</sup>では20kg/m<sup>3</sup>からの強度増進はみられなかった。

SR0E00に収縮低減剤を添加したSR3E00では強度が低下したが、SR3E00に膨張材を加えたSR3E20では膨張材の強度増進と相殺され、SR0E00と強度が同等となった。

b. 乾燥収縮ひずみ

(a) 収縮低減剤の効果

長さ変化の推移を図-4に示す。SR0E00の乾燥材齢26週の収縮ひずみは537×10<sup>-6</sup>であり、粗骨材に石灰石を用いたことにより一般的なコンクリートの収縮ひずみより小さく、ひび割れ制御指針の「高級仕様」に該当するコンクリートであった。

SR0E00に収縮低減剤を添加したSR3E00、SR6E00は、SR0E00の収縮ひずみのおおよそ5割以下となり、大きな収縮低減効果が確認された。図-5にコンクリートの質量減少率と長さ変化の関係を示す。収縮低減剤を用いたコンクリートでは、質量減少率に対して収縮側のひずみの変化が小さいことがわかる。

収縮低減剤の収縮低減効果として、式(2)から求めた収縮低減率を図-6に示す。

$$R_{SR} = (\epsilon_B - \epsilon_{SR}) / \epsilon_B \quad (2)$$

ここで、 $R_{SR}$ : 収縮低減率

$\epsilon_{SR}$ : 収縮低減剤添加コンクリートの乾燥収縮ひずみ

$\epsilon_B$ : 収縮低減剤無添加コンクリートの乾燥収縮ひずみ (ここではSR0E00)

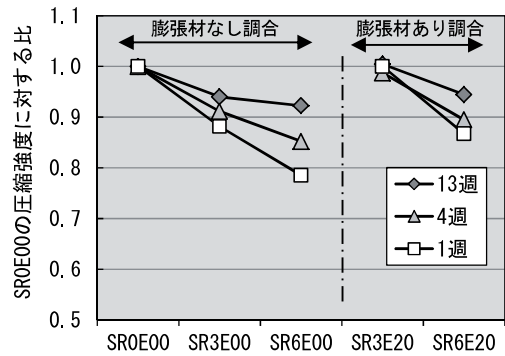


図-2 収縮低減剤の圧縮強度への影響

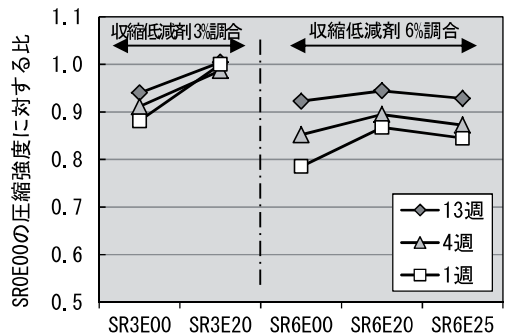


図-3 膨張材の圧縮強度への影響

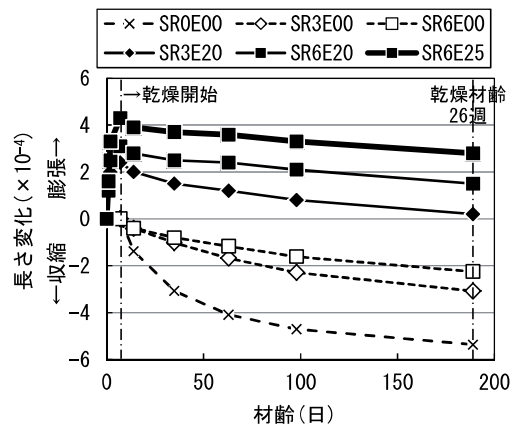


図-4 長さ変化の推移

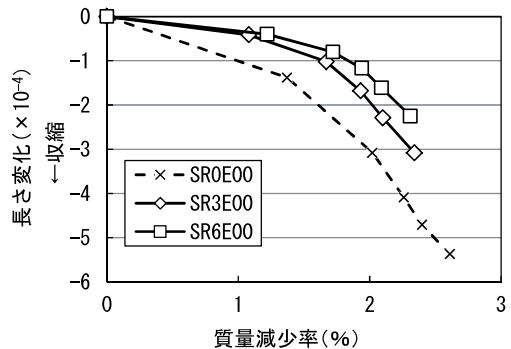


図-5 質量減少率と長さ変化の関係

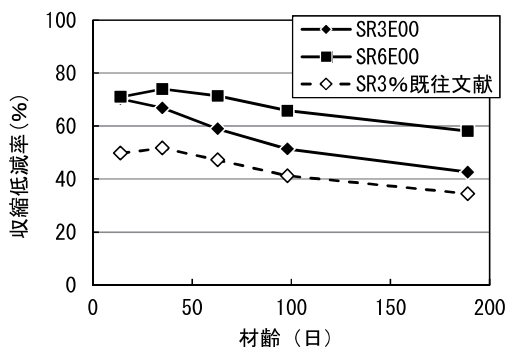


図-6 収縮低減率の推移

図-6には、SR3E00 と同一の収縮低減剤使用量における既往文献の収縮低減率<sup>5)</sup>を併せて示す。なお、既往文献の値とは、収縮低減剤使用量と収縮低減率の関係についての文献調査結果から提示されている近似式を用いて求めたものである。実験値は材齢の経過とともに低減率が緩やかに小さくなるものの、文献データと同様の傾向であり、また、SR3E00 の低減率については、文献データの平均値より大きい値であった。SR3E00 と SR6E00 を比較すると、添加率が2倍である SR6E00 のほうが低減率は大きかった。

乾燥材齢26週の収縮ひずみに対する4、8、13週の倍率を表-6に示す。SR0E00 については、JASS5 に示されている平均倍率<sup>6)</sup>とほぼ同じであったが、SR3E00、SR6E00 については、「膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針(案)・同解説」に示された平均倍率<sup>7)</sup>より大きく、特に材齢が小さいほどその差が大きい傾向にあった。図-6に示したように今回用いた収縮低減剤は、文献データよりも収縮低減効果が大きく、材齢が小さいほうが低減効果がより大きい傾向にあった。この傾向が倍率にも表れたと考えられる。なお、SR3E00 と SR6E00 の倍率はおおよそ同じであり、収縮低減剤の添加量による大きな違いはみられなかった。

(b) 膨張材の効果

膨張材を混入したコンクリートの膨張ひずみを表-7に示す。SR3E20、SR6E20、SR6E25 でそれぞれ 240、310、430×10<sup>-6</sup>であった。膨張ひずみは、収縮低減剤の添加量が多いほど、また、膨張材の混入量が多いほど大きい結果となった。これまで低熱セメントや普通セメントを用いた場合、収縮低減剤と膨張材の併用により膨張ひずみが大きくなることが報告されているが<sup>8)</sup>、中庸熱セメントにおいても同様の傾向であることが確認された。

(c) 乾燥収縮ひずみの評価

乾燥材齢26週のひずみを表-7に示す。SR6E00 と収縮低減剤と膨張材を併用した計4調合のコンクリートが乾燥収縮ひずみ 300×10<sup>-6</sup>以下を満足した。SR6E20

表-6 乾燥収縮ひずみの倍率

|                   | 収縮低減剤無使用            |        | 収縮低減剤使用            |        |        |
|-------------------|---------------------|--------|--------------------|--------|--------|
|                   | JASS5 <sup>6)</sup> | SR0E00 | 学会指針 <sup>7)</sup> | SR3E00 | SR6E00 |
| 乾燥材齢26週に対する4週の倍率  | 1.76                | 1.74   | 2.17               | 3.02   | 2.81   |
| 乾燥材齢26週に対する8週の倍率  | 1.31                | 1.31   | 1.48               | 1.83   | 1.92   |
| 乾燥材齢26週に対する13週の倍率 | 1.13                | 1.14   | 1.20               | 1.34   | 1.40   |

表-7 膨張ひずみと乾燥材齢26週のひずみ

|        | 膨張ひずみ (×10 <sup>-6</sup> ) | 乾燥材齢26週のひずみ (×10 <sup>-6</sup> ) [-:収縮, +:膨張] |
|--------|----------------------------|---|
| SR0E00 | 0                          | -537  |
| SR3E00 | 0                          | -308  |
| SR6E00 | 0                          | -225  |
| SR3E20 | 240                        | -68*  |
| SR6E20 | 310                        | +85*  |
| SR6E25 | 430                        | +205*   |

\*式(1)によるひずみ

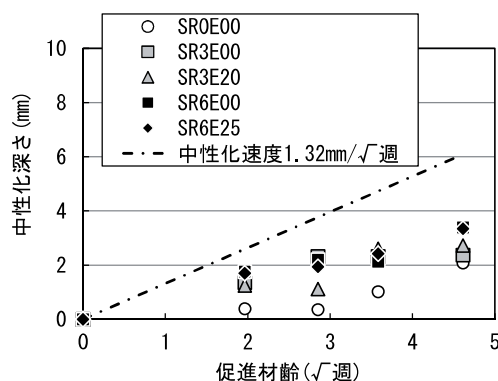


図-7 促進中性化試験結果

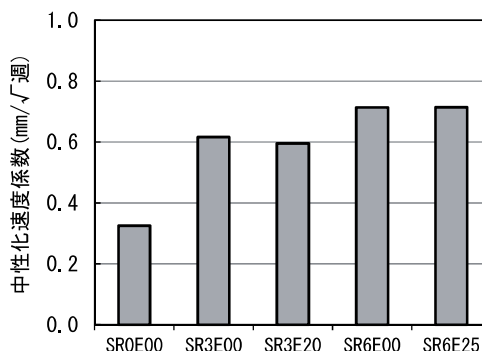


図-8 中性化速度係数

および SR6E25 については、膨張側のひずみに留まる結果であった。

c. 中性化速度

促進中性化試験結果として、促進材齢 21 週までの結果を図-7に、また、中性化の進行は時間の平方根に比例するものとして、実験データから最小二乗法により求めた中性化速度係数を図-8に示す。収縮低減剤を使用した調合の中性化の進行は、使用しないものよりやや大きい傾向にあるものの、いずれの調合も中性化の進行は小さく、中性化速度係数は 0.32~0.71 mm/√週であり、耐用年数 500 年を十分満足することが確認された。

膨張材の使用の有無については、SR3E00 と SR3E20、SR6E00 と SR6E25 の中性化速度係数はほぼ同じであり、中性化の進行への影響は小さいものと考えられる。

3. 実工事への適用

3.1 適用部材

適用部材の概要を表-8に示す。適用部材はスラブ基盤および梁で、コンクリートの打設量は 80m<sup>3</sup> である。なお、コンクリート表面は石張り仕上げであり、雨水などによる凍結融解作用を直接受けない条件下にある。

3.2 コンクリートの調合と製造方法

コンクリートの使用材料は表-2に示す通りである。調合については、調合実験結果に基づき、強度の安定性を考慮し表-3に示す SR3E20 を採用した。コンクリートの調合管理強度は 36N/mm<sup>2</sup> である。

コンクリートの製造はレディミクストコンクリート工

表-8 適用部材の概要

|           |   |
|-----------|---|
| 所在地       | 奈良市内  |
| 適用部材      | 薬師寺東塔のスラブ基盤および梁<br>(スラブ面積 196m <sup>2</sup> )                               |
| コンクリートの仕様 | 設計基準強度 30N/mm <sup>2</sup><br>耐用年数 500 年<br>乾燥収縮ひずみ 300×10 <sup>-6</sup> 以下 |
| 仕上げ       | 全面石張り仕上げ  |
| 打設量       | 80m <sup>3</sup>  |
| 打設時期      | 2016 年 12 月   |

表-9 フレッシュコンクリートの試験結果

|         | 試験回 | スランブ (cm) | スランブ フロー (cm) | 空気量 (%) | コンクリート 温度 (°C) |
|---------|-----|-----------|---------------|---------|----------------|
| 打設 1 回目 | ①   | 22.0      | 39.0×35.5     | 4.5     | 15             |
|         | ②   | 22.0      | 43.5×41.0     | 4.0     | 15             |
|         | ③   | 21.5      | 39.0×37.0     | 3.2     | 16             |
| 打設 2 回目 | ①   | 22.5      | 42.0×42.0     | 5.1     | 13             |
|         | ②   | 22.5      | 44.0×42.0     | 4.6     | 13             |
|         | ③   | 22.5      | 42.0×43.0     | 4.5     | 13             |

場でを行い、膨張材については実機ミキサへ直接投入して練上げ、収縮低減剤についてはベースコンクリートを積載したトラックアジテータに投入して、ドラムの回転による攪拌を行いコンクリートを製造した。

3.3 実施工結果

a. フレッシュ性状と施工状況

荷卸しの目標スランブおよび空気量は 21±2.0cm、4.5±1.5%とした。荷卸しにおけるフレッシュコンクリートの試験結果を表-9に、フレッシュ試験の状況を写真-1に示す。スランブ、空気量ともに目標値を満足する結果であった。

コンクリートの打設はポンプ車のブーム配管により行った。打込み状況を写真-2に、スラブの出来形を写



写真-1 フレッシュ試験の状況



写真-2 打込み状況



写真-3 スラブの出来形 (礎石設置後)

真-3に示す。スランプが21cmの設定であったこともあり、打込み施工性は良好であった。

なお、打設後は5日間の湿潤養生を実施した。

b. 圧縮強度

標準養生の圧縮強度の試験結果を表-10に示す。調合管理強度である36N/mm<sup>2</sup>を十分満足する強度が得られた。表中には供試体1個ごとの強度も併せて示すが、各打設日の3個の供試体の強度のばらつきは小さく、安定した品質のコンクリートが供給されていたと考えられる。

4. まとめ

歴史的建造物である薬師寺東塔の解体改修工事において新たに構築するスラブ基盤に、耐用年数が500年で、乾燥収縮ひずみが300×10<sup>-6</sup>以下となる超高耐久低収縮コンクリートを適用するため、収縮低減剤と膨張材の使用量、およびそれらの組合わせを因子とした調合実験を実施した。その結果、粗骨材に石灰石砕石を使用し、収縮低減剤と膨張材を併用した調合、および収縮低減剤をセメント質量の6%添加した調合において、300×10<sup>-6</sup>以下を満足することを確認した。また、収縮低減剤を6%添加し、膨張材を併用した場合、膨張側のひずみに留まる結果が得られた。そして対象部材においては、水セメント比42%で耐用年数500年を満足するコンクリートが得られることを確認した。

調合実験結果に基づき、収縮低減剤を3%、膨張材を20kg/m<sup>3</sup>を併用したコンクリートを歴史的建造物のスラブ基盤に80m<sup>3</sup>適用した。

5. あとがき

今回、現場適用したコンクリートの乾燥収縮ひずみの仕様が300×10<sup>-6</sup>以下であったが、よりひび割れの発生を抑えるため、調合実験で100×10<sup>-6</sup>以下が確認された調合を適用した。施工から5か月経過した時点では、ひび割れは確認されなかった。

今後も高まるであろうひび割れ低減の要望に応えるべく、より合理的な収縮低減効果が得られる材料の組合わせについて検討を進めたい。

謝辞

本実験の実施および工事への適用にあたり、法相宗大本山薬師寺様、奈良県文化財保存事務所様のご協力を頂いた。ここに、心より感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 例えば、小川亜希子ほか、「無収縮タイプコンクリートの化粧打放し壁への適用」その1~2、日本建築学

表-10 圧縮強度の試験結果 [単位 N/mm<sup>2</sup>]

|     | 材齢7日 |      | 材齢28日 |      |
|-----|------|------|-------|------|
|     | 打設   | 31.1 | [平均]  | 48.5 |
| 1回目 | 30.4 | 31.3 | 49.3  | 49.5 |
|     | 32.5 |      | 50.7  |      |
| 打設  | 28.3 | [平均] | 46.9  | [平均] |
| 2回目 | 28.5 | 28.2 | 45.8  | 45.7 |
|     | 27.9 |      | 44.5  |      |

- 会大会学術講演梗概集(九州)、pp.155-158、2016.8
- 2) 兵頭彦治、谷村 充、鈴木康範、溝渕利明、「各種セメントを用いた膨張コンクリートのひずみ曲線の検討」、土木学会第63回年次学術講演会講演梗概集、5-439、pp.877-878、2008.9
- 3) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説」、pp.99-126、2016
- 4) 谷村 充、兵頭彦治、「収縮低減剤を用いたコンクリートの基礎性状、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp.757-758、2002.8
- 5) 日本建築学会、「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状」、pp.211-212、2013.7
- 6) 日本建築学会、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2015」、p.369、2015.7
- 7) 日本建築学会、「膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針(案)・同解説」、p.102、2017.2
- 8) 日本建築学会、「膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状」、pp.120-121、2013.7