

(158) 高性能コンクリート及び断熱養生によるPC部材の製造工法に関する研究

|             |       |     |    |    |
|-------------|-------|-----|----|----|
| オリエンタル建設(株) | 技術研究所 | 正会員 | ○呉 | 承寧 |
|             | 同上    | 正会員 | 今井 | 昌文 |
|             | 同上    | 正会員 | 手塚 | 正道 |
| オリエンタル建設(株) | 新潟工場  |     | 小林 | 俊秋 |

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート工場における製造では、生産性の観点からプレストレス導入をコンクリート打込み翌日(材齢15~18時間程度)に設定している。このため、プレストレス導入に必要な強度(圧縮強度35 MPa以上)を確保するために蒸気養生を行って強度発現の促進を図っている。しかし、蒸気養生するためには、ボイラ設備や専門の管理者及び大量のエネルギーが必要である。

本文は、低コスト・省エネルギー・地球にやさしいコンクリートの製造を目指して、コンクリートを断熱養生し、コンクリート自体のエネルギー(水和熱)を有効に利用して、蒸気養生を行わなくても早強度を得る可能性について検討したものである。

## 2. 断熱されるコンクリートの圧縮強度の発現

### 2.1 圧縮強度発現と設計基準強度及び有効材齢の関係

コンクリート圧縮強度の発現は、通常材齢の関数として与えられるが、セメントの水和の程度は環境温度にも大きな影響を受け、マチュリティによって支配される。コンクリートの圧縮強度とマチュリティの関係については、以下の式が提案されている[1]。

$$f(t_T) = f_{28} \cdot \exp \{s [1 - (28/t_T/t_1)^{0.5}]\} \quad (1)$$

ただし、 $f(t_T)$  : 有効材齢 $t_T$ 日における圧縮強度 (MPa)

$f_{28}$  : 標準養生材齢28日における設計基準強度 (MPa)

$s$  : セメントの種類の影響による係数 (普通セメント0.25、早強セメント0.20)

$t_T$  : 有効材齢 (日)、 $t_1 = 1$  日

ここで、養生温度条件が異なる場合のマチュリティを考慮した有効材齢を採用した。次式に示すような有効材齢は、コンクリートの養生温度の高いほど、積算温度より、強度の発現を適切に評価することができる[2]。

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp [13.65 - 4000 / (273 + T(\Delta t_i) / T_0)] \quad (2)$$

ただし、 $t_T$  : 有効材齢 (日)

$\Delta t_i$  : 温度が $T(^{\circ}\text{C})$ である期間の日数

$T(\Delta t_i)$  : コンクリートの温度、 $T_0 = 1^{\circ}\text{C}$

設計基準強度 $f_{28}$ (材齢28日の圧縮強度)をそれぞれ40 MPa、60 MP及び80 MPaとして、普通セメント及び早強セメントを用いるコンクリートについて、圧縮強度発現と有効材齢の関係を図1に示す。この図から、コンクリートの強度発現は、早強セメントが普通セメントより早く、設計基準強度が高いほど、早いことが

分かった。例えば、プレストレスの導入に必要な強度(35 MPa以上、以下はプレ導入強度と言う)を満足させるためには、設計基準強度60 MPa及び80 MPaの早強セメントを用いたコンクリートで、それぞれ有効材齢が2.1日及び1.1日となる養生が必要である。

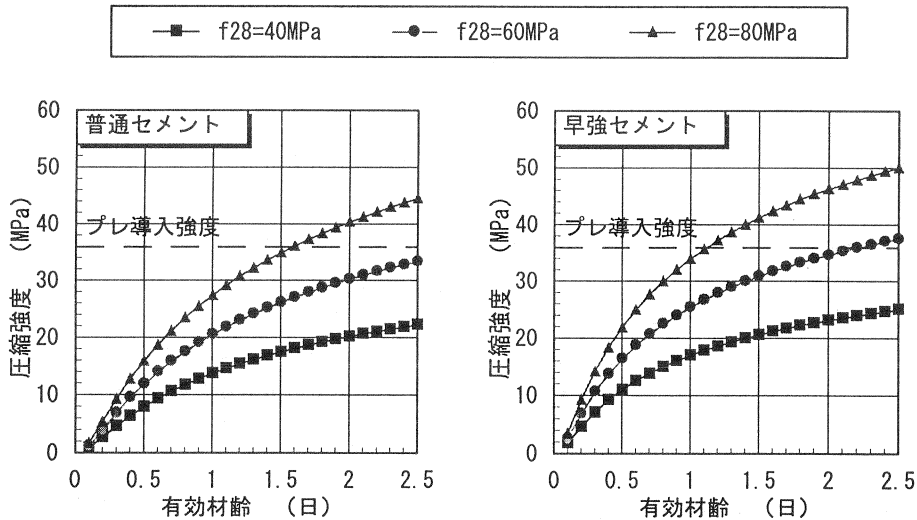


図1 圧縮強度の発現と有効材齢、セメントの種類及び設計基準強度の関係

## 2.2 有効材齢への断熱の効果

前述のように、プレテンション部材のプレ導入強度を得るためには、早強セメントを用いたコンクリートにおいて、設計基準強度が60 MPa配合で2日、80 MPa配合で1日の有効材齢を必要とする。しかしながら、通常のPC製品工場では、生産性の観点より、約15時間でプレ導入強度を必要とすることより、養生温度を20℃以上として、超早期(材齢15時間)に所定の有効材齢を満足させる必要がある。通常は、蒸気養生により超早期に所定の有効材齢を確保しているが、本研究では、セメントの水和熱をコンクリートの養生に有効利用することにより、給熱養生することなく、超早期に所定の有効材齢を満足させることを検討した。

コンクリートの断熱温度上昇は、次式によって、計算することができる[3]。

$$Q(t) = Q(1 - e^{-rt}) \quad (3)$$

ただし、 $Q = aC + b$ 、 $r = gC + h$ 、 $C$ は単位セメント量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $a$ 、 $b$ 、 $g$ 、 $h$ はセメント種類及び打設温度に関する係数、 $t$ は材齢(日)。

断熱されたコンクリートの有効材齢は、式(2)にコンクリートの断熱温度を用いて、次式のように、計算することができる。

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp[13.65 - 4000 / (273 + Q(\Delta t_i) / T_0)] \quad (4)$$

ただし、 $Q(\Delta t_i)$ が断熱されたコンクリートの温度(℃)である。

断熱された早強セメントを用いたコンクリートの有効材齢の発現は、図2に示すように、単位セメント量及び打設温度によって違うが、単位セメント量 $400 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以上のコンクリートにおいて、冬でも(打設温度10

℃)、打設後15時間に、コンクリートの有効材齢が1日を超えられる。

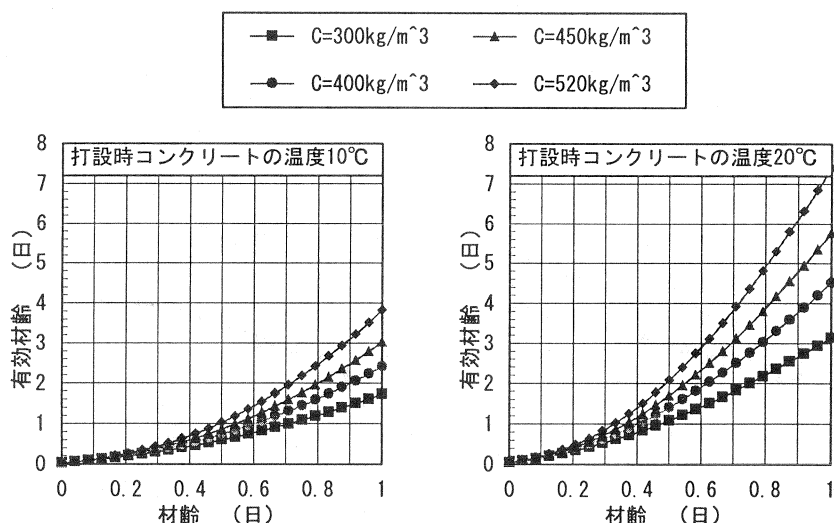


図2 断熱された早強セメントを用いたコンクリートの有効材齢の発現

### 2.3 断熱されたコンクリートの強度発現

断熱されたコンクリートの圧縮強度の発現は、式(1)に式(4)の有効材齢を用いて、次式により計算することができる。

$$f(t) = f_{28} \cdot \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left( \frac{13.65 - 4000}{273 + Q(\Delta t_i) / T_0} \right) / t_i} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (5)$$

ただし、 $f_{28}$ ：設計基準強度 (MPa)

$s$ ：セメントの種類の影響係数 (普通セメント： $s=0.25$ 、早強セメント： $s=0.20$ )

$\Delta t_i$ ：温度が $Q(\Delta t_i)$ である期間の日数 (日)

$Q(\Delta t_i)$ ：コンクリートの材齢 $t_i$ 日のに断熱温度 (℃)

この式により、コンクリートの強度発現は、打設時のコンクリートの温度や、コンクリートの設計基準強度、用いたセメントの種類及び単位量等によって、異なることが明らかになった。

コンクリートの強度発現に及ぼすこれらの要因の影響を比較検討するために、ここで、パラメーターをコンクリートの打設温度2種類 (10、20℃)、設計基準強度4レベル (40、60、80、100 MPa、それぞれの単位セメント量を300、400、500、600 kg/m³とした)、及び早強セメントとして、式(5)より求めたコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を図3に示す。この図から、断熱されたコンクリートの圧縮強度の発現は、打設時のコンクリートの温度、コンクリートの設計基準強度及び単位セメント量に影響されるが、設計基準強度60 MPaのコンクリートは、打設時の温度が20℃であれば、断熱養生により、打設後15時間に、プレ導入強度を超える強度発現があることが分かった。

### 3. 高性能コンクリート及び断熱養生によるコンクリート部材の製造実証実験

前述のように、計算上では給熱養生することなく、セメントの水和熱を有効利用して、断熱養生により、コンクリートは、超早期にプレ導入強度を発現することが可能である。しかしながら、この工法の実用化に際しては、工場実機で、コンクリートの使用材料、配合設計、製造、運搬、養生方法及び物性などの比較試

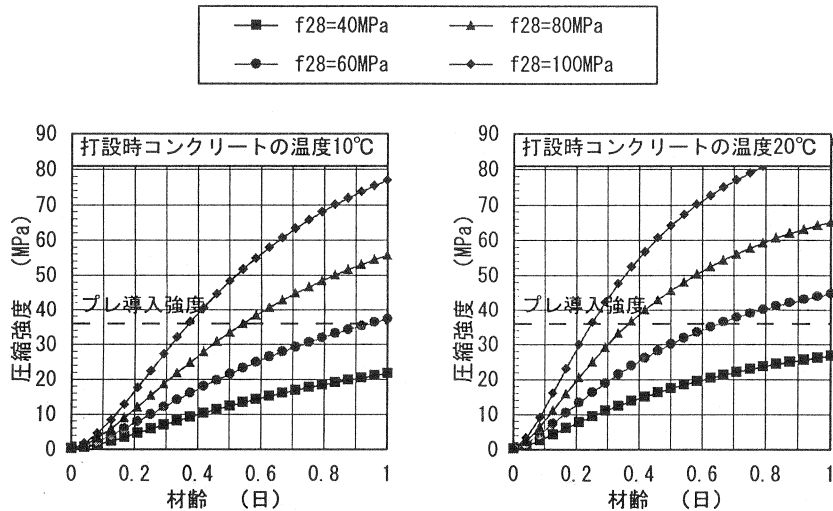


図3 断熱された早強セメントを用いたコンクリートの圧縮強度発現

験を行って、コンクリートのワーカビリティ、水和熱の発現、有効材齢と強度発現について確認する必要がある。よって以下にその検討を行った。

### 3.1 実験の概要

#### 1) 使用材料

セメント：早強ポルトランドセメント、比重=3.14

細骨材：砕砂、粗粒率 F.M.=2.67、表乾比重 =2.64

粗骨材：砕石2005、粗粒率 F.M.=6.76、表乾比重 =2.67、実績率=60.6%

高性能AE減水剤：ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤

#### 2) コンクリートの配合

コンクリートの配合強度は、 $f'_{ck}=70$  MPa (材齢28日、標準水中養生)である。スランプの範囲は、スランプ=16±2 cmである。空気量の範囲は 3.5 ±1.5%である。コンクリートの配合が表1に示す。

表1 コンクリートの配合及びフレッシュ性状

| W/C | s/a | SP/C | 単 位 量 (kg/m³) |     |     |     |     |       |    | 空気量 | スランプ | コンクリート<br>温度 (℃) |
|-----|-----|------|---------------|-----|-----|-----|-----|-------|----|-----|------|------------------|
|     |     |      | W             | C   | S   | G1  | G2  | SP    | AE |     |      |                  |
| (%) | (%) | (%)  |               |     |     |     |     |       |    | (%) | (cm) |                  |
| 35  | 45  | 1.50 | 140           | 400 | 871 | 537 | 537 | 6.000 | 0  | 2.8 | 19.0 | 22               |

### 3.2 実験の結果

#### 1) フレッシュコンクリートの性状

高性能AE減水剤を用いることにより、従来のプレストレストコンクリートの単位セメント量と同程度のセメント量 (400 kg/m<sup>3</sup>) でも、表1に示すように、流動性の高いコンクリートの製造が可能になった。

## 2) コンクリートの断熱温度の上昇

セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇を調べるために、厚さ180 mmの発泡スチロール箱にテストピースを入れ、断熱箱内部の雰囲気温度、断熱箱内のテストピースの内部と表面の温度、外気温度、及び外気中に放置されたテストピースの内部温度を測定した。これらの温度の経時変化を図4に示す。断熱されたコンクリートは、打設後5時間半から、温度上昇を始め、打設後16時間には、コンクリートの内部温度は、60℃以上に昇った。この傾向はセメントの水和反応の過程と一致している。セメントは、水と接触した10分後に、水和反応が誘導期に入り、水和放熱がほとんどなく、約5時間後、水和反応の加速期に入って大量に放熱する。

図4により、土木学会の断熱温度上昇の計算式(式3)による温度の計算値は、14時間以下の若材齢のコンクリートに対して、測定値と一致していないが、その後のコンクリートの断熱温度の計算値は、断熱されたコンクリートの温度の測定値とほぼ同じであることが分かった。また、断熱されたコンクリートの温度は、17時間後に、外気温度より、40℃以上高かったことより、発泡スチロールの優れた断熱効果が確かめられた。

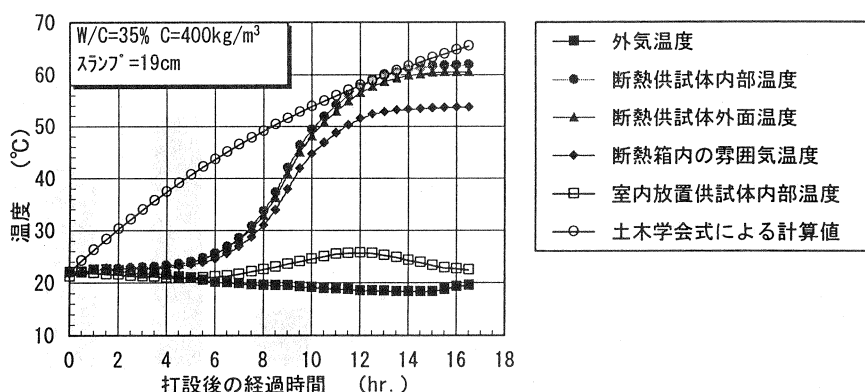


図4 コンクリートテストピースの断熱温度上昇

## 3) 断熱されたコンクリートの圧縮強度発現

コンクリートの圧縮強度発現と有効材齢の関係を確認するために、テストピースをそれぞれ標準養生と断熱養生し、圧縮強度を測定した。それらの圧縮強度と有効材齢をプロットして、図5に示す。この図により、養生方法が違ってもかかわらず、圧縮強度発現は有効材齢との良好な相関関係があることを確認した。

## 4) 桁の断熱養生試験

高性能コンクリート及び断熱養生により、P・C部材の製造工法の実用性を確認するために、長さ7200mm、幅400mm、高さ700mmのR・C軌道桁を、工場の実機プラントを用いて製造した。表1に示す高性能コンクリートを用いた桁は、写真1に示すように、発泡スチロールを用い

て断熱養生を行い、桁中央部と桁端部において、熱電対を用いて内部温度の測定を行った。テストピースは断熱養生している桁の脇に配置し、内部温度を測定した。コンクリート打設後15時間(脱枠時)における、各測定位置の温度を図6に示す。図に示すように、断熱された桁の中央部の温度は外気より52℃高く、70℃

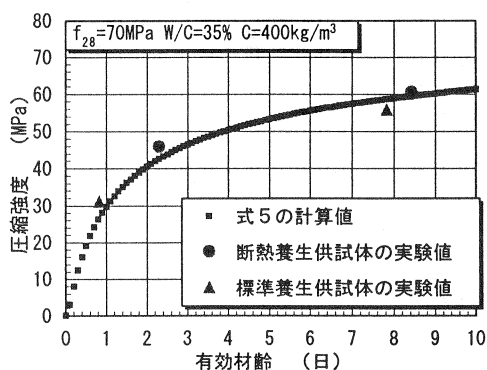


図5 圧縮強度と有効材齢の関係

に上昇した。桁の中央部と端部の温度差が約15℃ぐらい生じたが、断熱養生された桁の端部の温度は56℃に上昇した。テストピースが桁の脇に放置され、テストピースの中心温度は桁の端部表面温度より低く、49℃である。これにより、テストピースの強度は桁本体より低いことが分かった。ちなみに、テストピースの強度により、桁の強度を判断するのが安全だと考えられる。

断熱養生された高強度コンクリートの材齢17時間の圧縮強度は、図7に示すように、断熱養生している桁の脇に養生したテストピースの強度は断熱箱に養生したテストピースに比べて低いが、いずれも、外気中養生したテストピースより高く、40 MPa以上であった。この強度はプレテン桁の緊張解放強度を十分に満足するものであった。

#### 4. まとめ

コンクリートの圧縮強度発現と有効材齢の関係式及びコンクリートの断熱温度上昇式により、断熱されたコンクリートの圧縮強度発現式を提案した。この式により計算した結果、蒸気養生は行わなく、断熱養生により、コンクリートの圧縮強度の発現は、打設時のコンクリートの温度、コンクリートの設計基準強度及び単位セメント量に影響されるが、設計基準強度60 MPaのコンクリートは、打設時のコンクリートの温度が20℃あれば、断熱養生により、打設後15時間に、プレ導入に必要な強度を超える強度発現があることが分かった。さらに、工場で、高性能コンクリートを用い、断熱養生により、コンクリートの超早期強度発現を確認した。この新しい製造工法により、低コストの高性能プレストレストコンクリートの製造が可能になった。

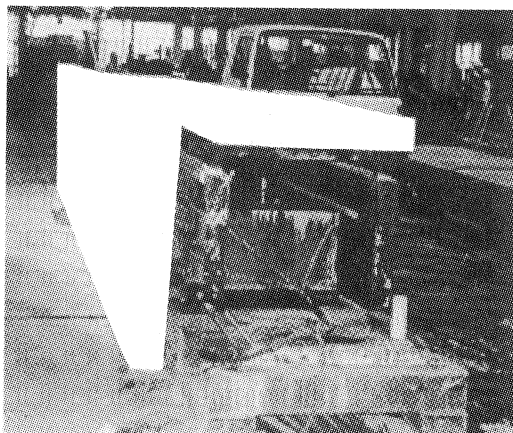


写真1 R C桁の断熱養生

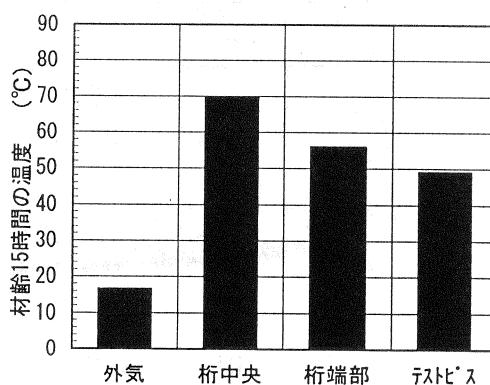


図6 断熱された桁及びテストピースの温度

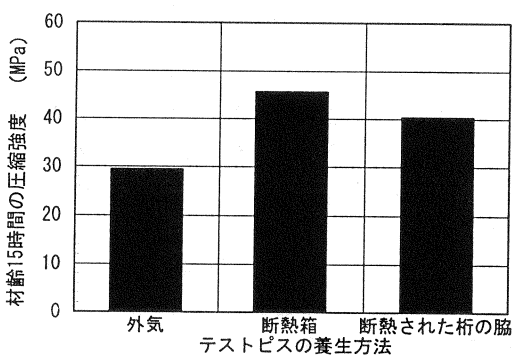


図7 断熱されたテストピースの圧縮強度

#### 参考文献

- 1) CEB-FIP Model Code 1990
- 2) 日本コンクリート工学協会、自己収縮研究委員会報告書、pp.93-94、1996
- 3) 日本土木学会、コンクリート標準示方書(施工編)、pp.185-186、1996