

(136) 高強度コンクリートにおけるテストピースの養生方法について

日本道路公団 名古屋建設局四日市工事事務所	中須 誠
同 上	佐々木 伸行
第二名神高速道路 木曾川橋東工事共同企業体 正会員	○手塚 正道
同 上	鈴木 洋一

1. はじめに

構造体で使用したコンクリートの強度管理は、打込み時に同時に採取したサンプル(テストピース)を材齢28日まで20℃水中養生(標準養生)したもので圧縮試験を行い確認している。さらに、例えば、プレストレス導入時、脱型時など初期材齢における強度確認が必要な場合には、テストピースを構造体と同一養生下に置いたもの(現場養生)を所定の作業前に圧縮試験を行い確認している。

近年、高性能AE減水剤の開発、普及に伴い施工性の優れた高強度コンクリートの製造が容易となり、構造体に使用されるケースが増加している。高強度コンクリートは、一般に単位セメント量が多く、特に早強ポルトランドセメントを使用する場合には、硬化に伴う発熱量が大きく、部材断面が大きくなってもコンクリート温度は大きく上昇する。また、コンクリート強度の発現は、コンクリートの温度履歴と密接な関係があり、積算温度や有効材齢というマチュリティによる指標で評価できることが知られている[1]。このため、高強度コンクリートにおいて初期材齢で強度確認を行う場合に、従来のようなテストピースを構造体と同一養生下に置いたものでは、構造体内部との温度差が大きくなり、構造体との強度差が大きくなるものと考えられる。従来の方法は構造体の強度を安全側に推定することになるが、この情報に基づいて、配合設計や構造体の養生計画を行うと、コストアップにつながるばかりでなく、富配合や過剰な給熱養生による弊害から構造体の長期強度の低下、耐久性の低下、温度応力の増加などにつながる可能性がある。このようなことから、高強度コンクリートを用いた場合の構造体強度管理用テストピースは、構造体と同一の温度履歴を与える養生(以下、温度追従養生)を行って、構造体の強度を適切に評価することがコストダウン[2]および耐久性の向上につながるものと考えられる。

ここでは、温度追従養生を行い構造体強度を適切に評価することによって、冬期において給熱養生を省略した事例およびセメントの種類を早強から普通に変更した事例について検討した内容を述べる。

2. 圧縮強度と有効材齢の関係

高性能AE減水剤を用いた高強度コンクリートの材齢28日までににおける圧縮強度の発現は、CEB MC90[3]式を修正した次式が適用性の高いことが報告されている[4]。

$$f(t) = f_{28} \cdot \exp\{s_f [1 - ((28 - a_f)/(t - a_f))^{0.5}]\} \quad (1)$$

ただし、 $f(t)$ :有効材齢 $t$ 日における圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)  
 $f_{28}$ :標準養生材齢28日における圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)  
 $s_f$ :セメントの種類の影響による係数  
 $a_f$ :凝結時間の影響による係数(日)  
 $t$ :有効材齢(日)

また、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として、一般に次式が用いられている[3]。

表-1 コンクリートの示方配合

セメントの種別	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランパ <sup>a</sup> (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				高性能AE減水剤 (C*%)	AE助剤 <sup>13</sup> (C*m%)
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
早強PC	60	20	20	4.5	32	42	163	509	681	971	1.20 <sup>11</sup>	3.5
普通PC	60	20	20	4.5	32	42	163	509	684	971	1.25 <sup>12</sup>	6.0

\*1:ポルトランド SP8S(B-A) \*2:ポルトランド SP8S(R) \*3:マイクロF101

$$f(t) = f_{28} \cdot \exp\left\{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28-a}{t-a}\right)^{0.5}\right]\right\}$$

; f<sub>28</sub>=77.0, s=0.105, a=0.408

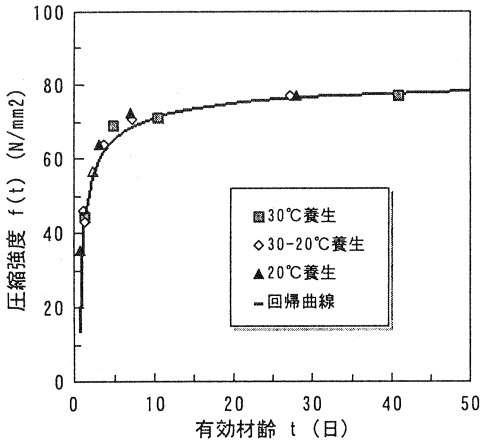


図-1 圧縮強度と有効材齢の関係 (早強ポルトランドセメント)

$$f(t) = f_{28} \cdot \exp\left\{s \cdot \left[1 - \left(\frac{28-a}{t-a}\right)^{0.5}\right]\right\}$$

; f<sub>28</sub>=79.0, s=0.263, a=0.124

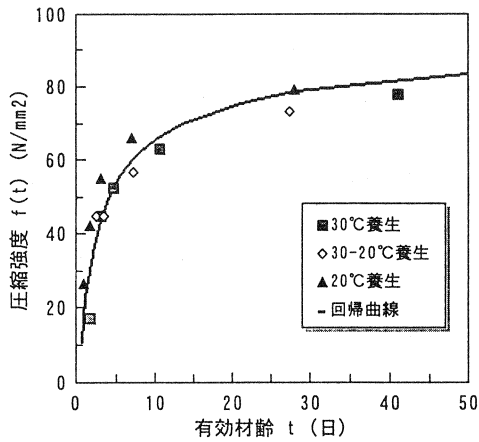


図-2 圧縮強度と有効材齢の関係 (普通ポルトランドセメント)

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

ただし、 $\Delta t_i$ : 温度がT(°C)である期間の日数  
 $T_0 = 1^\circ\text{C}$

第二名神高速道路木曾川橋 (PC・鋼複合上部工) 東および西工事では、プレキャストセグメントのコンクリート配合として、早強ポルトランドセメント (以下、早強PC) を用いた配合 (P4-2(A))と普通ポルトランドセメント (以下、普通PC) を用いた配合 (P4-2(A)-I) を季節によって使い分けている。その配合を表-1に示す。また、図-1には、早強PCを用いた配合について試し練りに伴って行われた強度試験結果と有効材齢の関係を示す。有効材齢は、ダミーのテストピースに埋め込んだ熱電対による温度計測から求めたものである。養生方法としては、①30°C恒温室で練り混ぜ24時間放置し、脱枠後30°C水中養生したもの (図中30°C養生)、②30°C恒温室で練り混ぜ24時間放置し、脱枠後20°C水中養生したもの (図中30-20°C養生)、③20°C恒温室で練り混ぜ24時間放置し、脱枠後20°C水中養生したもの (図中20°C養生) の3種類である。回帰曲線は、式(1)における  $s_f, a_f$  を未知数としたものである。同様に、図-2には普通PCを用いた配合の結果を示す。図-1および図-2からも、養生方法に関係なく有効材齢と圧縮強度とは相関関係があり、有効材齢を取り入れた式(1)で精度の高い回帰曲線が得られることが確認できる。

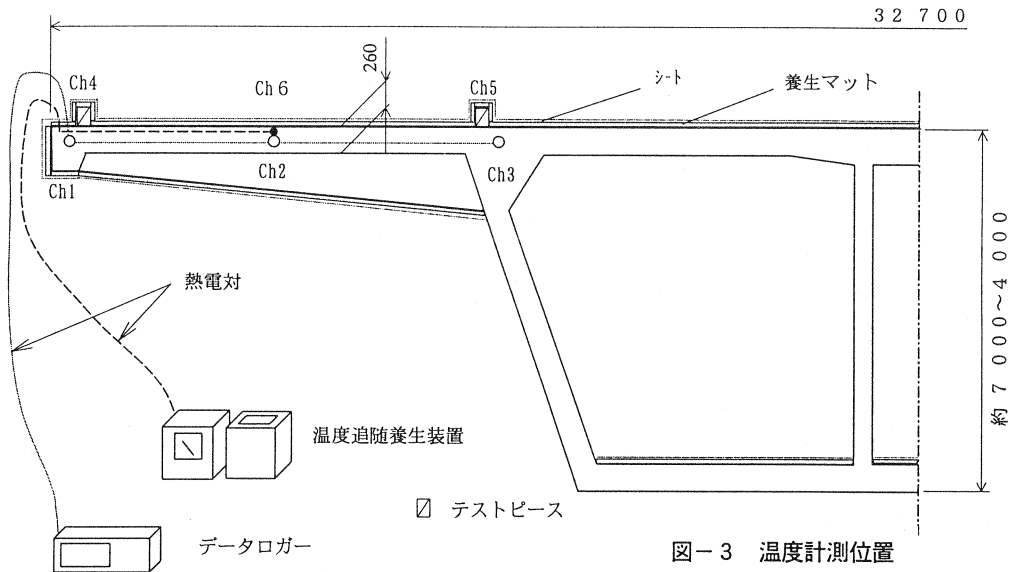


図-3 温度計測位置

### 3. 冬期養生方法の検討

ここでは、冬期の養生として給熱養生の必要性を、強度管理用テストピースの養生方法と併せて検討したものである。

#### 3.1 構造体とテストピースのコンクリート温度履歴

冬期における構造体各場所のコンクリート温度履歴と養生シート内で構造体と同一養生下に置いたテストピースのコンクリート温度履歴の違いについて、図-3に示す測定位置の結果を図-4に外気温と併せて示す。配合は早強PCを使用したものである。養生方法は養生マットと養生シートによる覆いで、特に給熱養生はしていない。ただし、上床版張出し部の鋼製型枠の下面には断熱材を取り付けている。

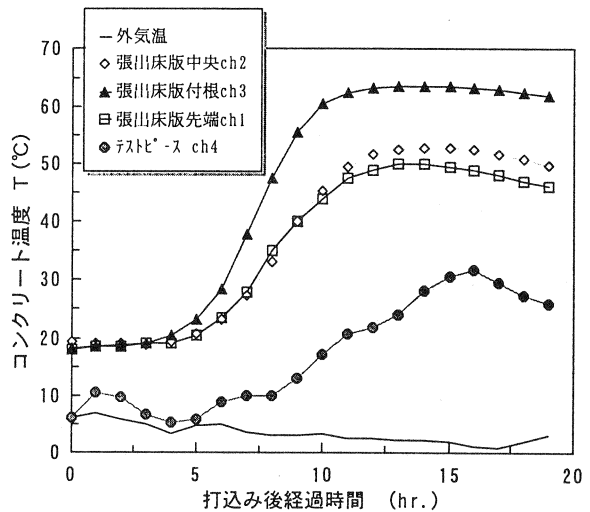


図-4 各場所のコンクリート温度履歴

図-4によれば、外気温は5°C程度であったが、比較的大断面となる張出し上床版の付け根部(ch3)は最高温度が60°Cを越えている。構造体の他の部分は、最高温度が50°C程度で概ね同一な温度履歴を示しているのに対し、テストピースの温度は、構造体の温度に比べ20°C程度低い結果となっている。

#### 3.2 構造体およびテストピースの有効材齢と圧縮強度

コンクリートの初期強度としては、施工サイクルの観点から最短で材齢18時間において30N/mm<sup>2</sup>が求められている。

図-4に示す温度履歴から、張出し床版先端部とその上に置いたテストピースの材齢18時間における有効材齢と、その有効材齢から図-1に示す回帰曲線で求めた圧縮強度(以下、推定強度)を表-2に示す。ま

表-2 構造体およびテストピースの有効材齢と推定強度

材齢	材齢18時間		材齢24時間		
	有効材齢 (day)	推定強度 (N/mm <sup>2</sup> )	有効材齢 (day)	推定強度 (N/mm <sup>2</sup> )	実測値 (N/mm <sup>2</sup> )
張出し床版先端部(構造体)	1.69	52.5	2.25	57.0	56.7
張出し床版先端部(テストピース)	0.68	29.7	1.01	41.8	46.1

た、材齢24時間で圧縮強度試験を実施したので、その時の実測値と推定強度の比較も併せて示す。構造体における張出し床版先端部の実測値については温度追従養生したテストピースにより得られたものである。

材齢24時間における推定強度と実測値を比較すると両者は概ね一致しており、温度追従養生は構造体の強度を精度良く推定できる方法であると言える。また、図-1に示す回帰曲線に基づいて、有効材齢から強度を推定することの妥当性も検証された。

材齢18時間における構造体とテストピースを比較すると、テストピースは構造体に比べ有効材齢では1日程度小さく、強度では23N/mm<sup>2</sup>程度低い結果となっている。

### 3.3 冬期養生方法

表-2に示す通り、従来の方法である構造体と同一養生下に置いたテストピースで管理した場合には、材齢18時間において必要とする30N/mm<sup>2</sup>は満足しておらず、何らかの給熱養生の必要性が生じることになる。しかし、構造体の強度は十分に満足しており、冬場においても特に給熱することなく、シートで覆うなど構造体に発生する温度を逃がさない方法が適切である。この場合には、強度管理用テストピースを構造体と同一温度履歴とすることができる温度追従養生を行い、構造体の強度を精度良く管理することが求められる。

## 4. 使用セメント種別の検討

早強PCを用いた配合では、荷卸し時のコンクリート温度が20℃に近づくにつれてフレッシュコンクリートのこわばりが比較的早い時期に生じるようになり、コールドジョイントの発生、内部振動機の締固め範囲が狭くなることによって締固め不良部の発生等が懸念されるようになってきた。また、水和熱によってコンクリート温度が上昇し、OLDセグメントとの間で温度応力が大きくなりひび割れが発生する危険性もある。

ここでは、セメントを普通PCに変更した場合の温度履歴を計測し、材齢18時間に所要強度30N/mm<sup>2</sup>を満足することを確認すると共に、強度管理用テストピースの養生方法について検討したものである。

### 4.1 構造体とテストピースのコンクリート温度履歴

普通PCを用いた配合におけるプレキャストセグメント各場所のコンクリート温度履歴と養生シート内で構造体と同一養生下に置いたテストピースのコンクリート温度履歴の違いについて、図-3に示す測定位置の結果を図-5に外気温と併せて示す。

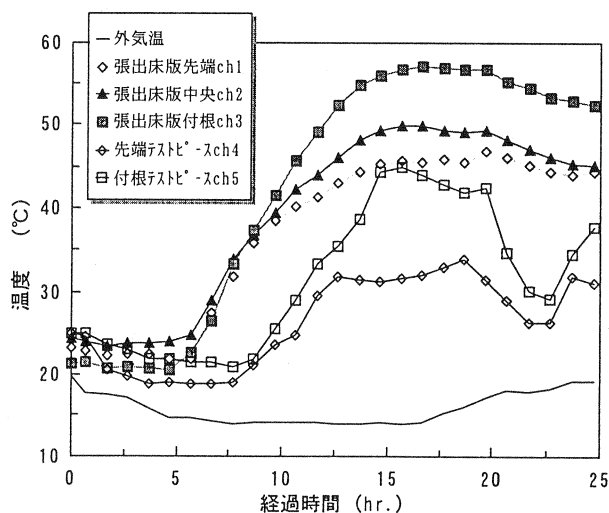


図-5 各場所のコンクリート温度履歴

図-5によれば、セグメントにおいて温度上昇が大きいのは、張出し床版付け根、中央、先端の順であった。先端は部材厚が中央に比べて厚くなっているが、端部であるために放熱が大きく、温度上昇が中央に比べて小さかったものと考えられる。テストピースの温度は、構造体に比べて3時間程度遅れて上昇を開始しているが、これは仕上げ養生マットおよびシートで覆ったことによって構造体の温度上昇による放熱を受けて上昇したものである。ほぼ同位置での構造体の温度と比較すると、10~15℃程度低い結果となっている。

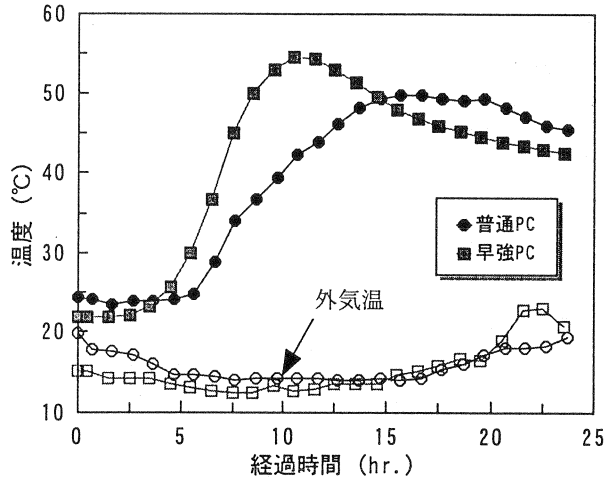


図-6 普通PCと早強PCの構造体温度履歴の比較

4. 2 普通PCを用いた場合と早強PCを用いた場合の構造体温度履歴の比較

普通PCを用いた場合と早強PCを用いた場合の構造体温度履歴を比較したものを図-6に示す。外気温がほぼ同じ時期のもので、張出し床版中央部について計測したものである。

図-6によれば、普通PCを使用した場合は、早強PCを使用した場合に比べて、温度上昇が始まるのが2時間程度遅れ、上昇速度は緩やかである。ピーク時材齢は5時間程度遅く、ピーク温度は5℃程度低いことがわかる。

4. 3 構造体およびテストピースの有効材齢と圧縮強度

図-6に示す普通PCを用いた場合と早強PCを用いた場合の構造体温度履歴、および図-5に示す2箇所のテストピースの内、比較的溫度上昇が大きい張出し床版付け根部の上に置いたテストピースについて、クリティカルとなる材齢18時間における有効材齢と、その有効材齢から図-1および図-2に示す回帰曲線で求めた推定強度を表-3に示す。また、材齢22時間における圧縮強度実測値と推定強度の比較も併せて示す。構造体における実測値については温度追従養生したテストピースにより得られたものである。

材齢18時間における構造体の早強PCを用いた場合と普通PCを用いた場合を比較すると、普通PCを用いた場合は早強PCを用いた場合に比べ強度は23N/mm<sup>2</sup>程度低くなっているが、所要強度30N/mm<sup>2</sup>は満足している。普通PCを用いた場合について構造体とテストピースを比較すると、比較的溫度が上がりやすい場所に置いたテストピースにおいても構造体に比べ有効材齢で0.4日程度小さく、強度では5N/mm<sup>2</sup>程度低い結果となっている。

材齢22時間における推定強度と実測値を比較すると両者は良く一致しており、温度追従養生は構造体の強

表-3 構造体およびテストピースの有効材齢と推定強度

材齢	セメントの種別	材齢18時間		材齢22時間		
		有効材齢 (day)	推定強度 (N/mm <sup>2</sup> )	有効材齢 (day)	推定強度 (N/mm <sup>2</sup> )	実測値 (N/mm <sup>2</sup> )
張出し床版中央部 (構造体)	早強PC	2.03	55.5	-	-	-
張出し床版中央部 (構造体)	普通PC	1.58	32.5	2.10	38.3	39.7
張出し床版付け根部 (テストピース)		1.21	27.2	1.60	32.7	32.5

度を精度良く推定できる方法であると言える。また、図-2に示す回帰曲線に基づいて、有効材齢から強度を推定することの妥当性も検証された。

#### 4. 4 使用セメント種別の変更

図-5, 6および表-3に見られるように、普通PCを用いた場合は早強PCを用いた場合に比べると強度発現は遅いが、練り上がりコンクリート温度が20℃を越える場合には、構造体において施工サイクル上必要とされる材齢18時間における強度を満足しており、施工性および温度応力の低減のために早強PCから普通PCに変更することにした。ただし、この場合においてもテストピースは温度追従養生し、構造体の強度を精度良く管理することが求められる。

#### 5. 強度管理用テストピースの養生方法

2つの事例で示したように、水セメント比が32%の高強度コンクリートでは、部材厚さが260mm程度であっても水和に伴う発熱は大きくコンクリート温度が上昇する。このため、初期材齢における強度管理用テストピースの養生が従来のような構造体と同一養生下では構造体との強度差は大きく適切な評価は困難である。強度管理用テストピースの養生は温度追従養生によって構造体の強度を精度良く管理することが望ましい。ただし、温度追従させる構造体の温度測定位置については十分検討して定める必要がある。

第二名神高速道路木曾川橋・揖斐川橋工事におけるプレキャストセグメントの初期材齢強度の確認には、張出し上床版先端部を温度追従養生したテストピースを用いて強度試験を行っている。張出し上床版先端部を追従養生の対象としたのは、構造体の中で最も温度上昇が小さいこと、最後に打設されるため所定(プレストレス導入)の時期までの材齢が短くなること、また、その部分にはプレストレス導入用の横締めケーブル定着体があり、支圧応力の観点から強度面で最もクリティカルになることを考慮したものである。

#### [参考文献]

- [1]原田和樹、牛島栄：マチュリティーを用いた構造体コンクリートの強度推定方法に関する検討、コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集、pp. 77-84、1998. 12
- [2]呉承寧、今井昌文、手塚正道他：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、プレストレストコンクリート技術協会 第7回シンポジウム論文集、pp. 833-838、1997. 10
- [3]CEB-FIP Model Code 1990
- [4]日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書、1996. 11.