

# 断熱養生工法におけるコンクリートの配合設計法およびその実施事例

呉 承寧\*1・佐橋 裕隆\*2・堀 博\*3・吉野 博\*4

## 1. はじめに

プレキャストコンクリートの製品工場およびプレストレストコンクリート構造物の建設現場では、早期に脱型またはプレストレスを導入するために、ある程度以上のコンクリートの初期強度が要求される。

コンクリートの初期強度を得るために、蒸気養生はもっとも一般的な方法であるが、ボイラー設備が必要となり、さらに、エネルギーの消費や、CO<sub>2</sub>の排出などの環境問題もある。

コンクリートの断熱養生工法とは、蒸気養生の代わりに、断熱性の高い断熱材を用い、コンクリート中セメントの水和発熱を有効に利用し、コンクリートの初期強度を確保する工法である。

断熱養生工法を用いる場合、確実にコンクリートの初期強度を確保するために、コンクリートの配合設計には、コンクリートの強度発現に及ぼすコンクリートの配合強度と水和発熱に関するコンクリートの温度履歴の影響を考慮する必要がある。本文は、断熱養生工法に用いるコンクリートの配合設計法を紹介することと並びに、蒸気養生の代わりに断熱養生工法を用いた富田山城線高架橋工事におけるコンクリートの配合設計を実施例として、その配合設計、実験室での試験練りおよび工事現場での計測によって配合結果の検証を述べるものである。

## 2. 断熱養生コンクリートの配合設計法

断熱養生工法におけるコンクリートの配合設計は、通常のコンクリートの配合設計とおおむね同じであるが、初期強度を確保するために、通常の配合設計に比べ、コンクリートの強度発現に影響を及ぼすコンクリートの配合強度およびコンクリートの温度履歴を正確に決める必要がある。

一般に、コンクリートの配合強度は、20℃の水中で標準養生されたコンクリートの材齢28日の圧縮強度とし、コンクリートの水セメント比により決められる。

また、コンクリートの温度履歴は、コンクリートの発熱特性とコンクリートから外への熱伝達速度により決められる。

コンクリートの温度履歴は、コンクリートに使用するセメントの種類、単位セメント量および打設時のコンクリート温度をパラメータとしたコンクリートの断熱温度上昇量

の計算式を使用し、コンクリート部材の形状・寸法、型枠・養生シートの熱伝達率、および外気温度などを条件として、3次元FEMソフトを用いた解析で予測することができる。

これらの一連作業は、図-1に示すフローにしたがって行い、コンクリートの配合強度および単位セメント量を決める。

以下の節では、具体的なコンクリートの配合強度および単位セメント量の決め方を説明する。

### 2.1 仮配合強度と単位セメント量の設定

一般的に、コンクリートの配合強度は、コンクリートの設計基準強度に生コンクリート工場の圧縮強度の変動を考慮した割増係数をかけた強度である。断熱養生工法を用いる場合、使用するコンクリートの配合強度は図-1に示すフローに従って決定するが、最初の仮配合強度は、通常のコンクリートの配合設計と同じ、設計基準強度に生コンクリート工場の圧縮強度の変動を考慮した割増係数をかけた強度とする。

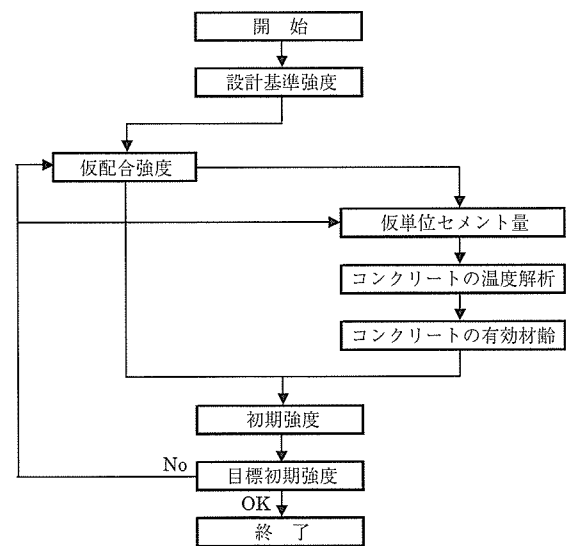


図-1 配合強度と単位セメント量の設定

### 2.2 コンクリートの温度解析

3次元のFEM温度解析ソフトを用い、施工現場の気温、

\*1 Chengning WU：オリエンタル建設(株) 技術研究所 副所長  
 \*2 Hirotaka SAHASHI：オリエンタル建設(株) 名古屋支店 係長  
 \*3 Hiroshi HORI：三重県北勢県民局四日市 建設部 技師  
 \*4 Hiroshi YOSHINO：オリエンタル建設(株) 名古屋支店 副部長

型枠および養生シートの熱伝導率（断熱性能）およびコンクリート温度などの解析条件を決め、施工される部材を対象にして、コンクリートの打設後の温度履歴、たとえば、打設後16時間、脱型時までの温度履歴を解析することができる。

### 2.3 コンクリートの有効材齢の計算

コンクリートの温度履歴を用いて式(1)により、相応のコンクリートの養生温度と養生時間を考慮した有効材齢を計算することができる。

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

ここに、

$t_r$ ：有効材齢（日）、

$\Delta t_i$ ：温度が  $T$ （℃）である期間の日数、

$T_0 = 1$ ℃。

### 2.4 コンクリートの初期強度の計算

コンクリートの配合強度および前述の有効材齢を用い、式(2)により、その時のコンクリートの圧縮強度を算定する<sup>2)</sup>。

$$f(t_r) = f_{28} \cdot \exp \{ 0.2 [ 1 - (28 / t_r)^{0.5} ] \} \quad (2)$$

ここに、

$f(t_r)$ ：有効材齢  $t_r$  日における圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）、

$f_{28}$ ：標準養生材齢28日における配合強度、

$t_1 = 1$ 日

もし、計算されたコンクリートの初期強度が脱型強度を満足しなければ、コンクリートの配合強度または単位セメント量を大きく設定し、温度解析から初期強度まで再計算する。このような作業は計算された初期強度が脱型強度を満足するまでに、繰返し行う必要がある。

## 3. 断熱養生コンクリートの配合設計実施例

### 3.1 実施工事の概要

実施工事は、東名阪自動車道（四日市東I.C.）と四日市港を結ぶ富田山城線の本線上部工工事であり、施工区間は現在平面交差である国道1号線を含めた近鉄名古屋線からJR関西本線間の高架橋上部工である。工事の概要および橋梁部全体一般図をそれぞれ表-1と図-2に示す。

表-1 工事の概要

工事名	富田山城線〔街路〕緊急地方道路整備（改築）工事（本線上部工）
事業主	三重県北勢県民局四日市建設部
構造形式	6径間連続PC箱桁橋×6橋 3径間連続PC箱桁橋×2橋
全長	774.305 m（I期線） 776.405 m（II期線）
架設方法	プレキャストセグメントによるスパンバイスパン工法
有効幅員	7.25 m
セグメント数	545 個
工期	2001年12月～2004年3月

### 3.2 セグメントの製作

#### (1) 概要

セグメント製作はショートライン・マッチキャスト方式で施工した。標準セグメントの形状および寸法を図-3に示す。

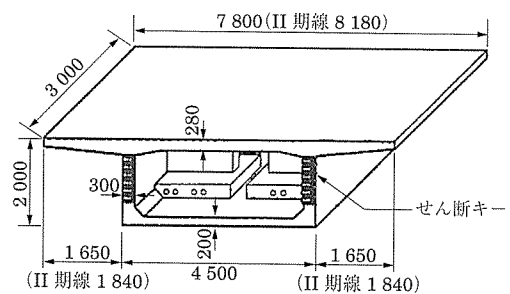


図-3 標準セグメントの形状と寸法

#### (2) コンクリートの仕様

セグメントの製作に用いたコンクリートは、構造設計および施工計画により、表-2に示す仕様が要求されている。

表-2 コンクリートの仕様

設計基準強度（材齢28日）	50 N/mm <sup>2</sup>
脱型強度（材齢16時間）	14 N/mm <sup>2</sup>
スランプ（荷卸時）	15 ± 2.5 cm
空気量（荷卸時）	4.5 ± 1.5 %

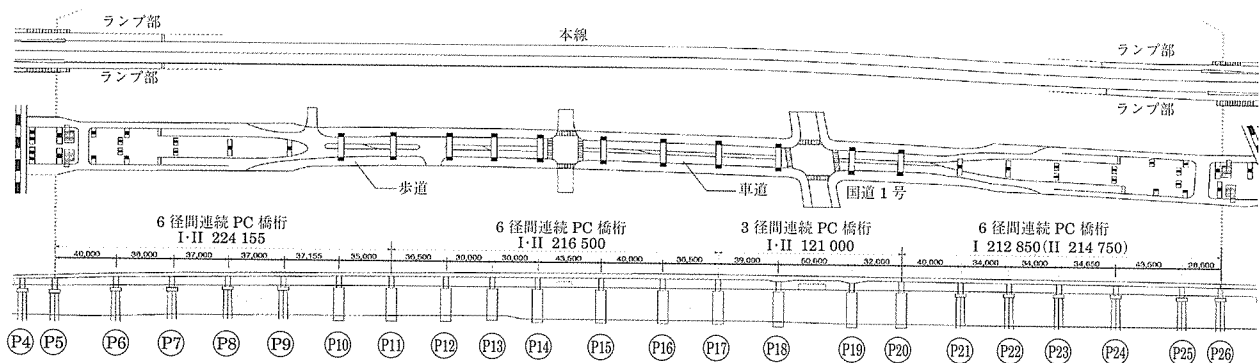


図-2 橋梁部全体一般図

(3) コンクリートの使用材料

前述の仕様に要求された性能を有するコンクリートを得るために、セメントにおいて強度発現の早い早強ポルトランドセメント、減水剤においてコンクリートの単位水量の低減や、ワーカビリティの確保等の目的から高性能 AE 減水剤を選定した。表 - 3 にコンクリートの使用材料の一覧を示す。

表 - 3 コンクリートの使用材料

材料	種類	主な物性
セメント	早強ポルトランドセメント	密度：3.14,
粗骨材	2005 砕石, 藤原鉱山産	密度：2.69, F.M.：6.72
細骨材	陸砂, 三滝川流域産	密度：2.58, F.M.：2.73
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系
	AE 剤	アルキルエーテル系

(4) コンクリートの養生

セグメント製作工程上、型枠脱型時に必要なコンクリートの圧縮強度 14 N/mm<sup>2</sup> 以上を、コンクリート打設の 16 時間後に、確保する必要がある。とくに、強度発現が懸念される冬期におけるコンクリートの養生は、これまでポイラーによる蒸気養生を行ってきたのが通例であるが、本工事ではセグメント製作工程の遵守、蒸気養生設備等のコスト縮減と CO<sub>2</sub> 排出削減等環境保全を目的に断熱養生工法を採用した。

セグメントの製作に用いた断熱養生工法とは、断熱性の高い養生シートと断熱材を使用した型枠によりコンクリートを断熱し、その水和発熱を有効利用してコンクリートを促進養生する工法である。現場での断熱養生の概要を図 - 4 示す。下記に具体的な施工状況を示す。

- ①上屋設備にて、製造するセグメント全体を覆う。
- ②表面の初期乾燥を防止するため、コンクリートが露出する上床版および下床版には湿潤養生マットを敷設し、その上に断熱養生シートを覆う。
- ③側枠・内枠・底枠の鋼製型枠に断熱材として、厚さ 50

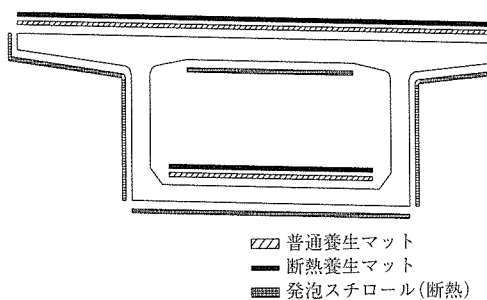


図 - 4 現場での断熱養生の概要

表 - 4 コンクリートの示方配合

最大骨材寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 SP
20	15 ± 2.5	37	4.5 ± 1.5	41	158	427	699	1049	3.630

mm の発泡スチロールを張付ける。

3.3 セグメント製造用コンクリートの配合設計

(1) 仮配合強度・単位セメント量の設定

本工事においてコンクリートの設計基準強度は 50 N/mm<sup>2</sup> であり、使用する生コンクリート工場の圧縮強度の割増係数は 1.2 である。よって、本工事に使用するコンクリートの仮配合強度は 60 N/mm<sup>2</sup> とした。

また、生コンクリート工場の実績により、配合強度 60 N/mm<sup>2</sup> のコンクリートは、表 - 4 に示す示方配合があり、単位セメント量が 427 kg/m<sup>3</sup> である。本工事には、この単位セメント量を仮単位セメント量とした。

(2) コンクリート温度の解析

本工事における冬期断熱養生の場合のコンクリートの温度を解析するために、表 - 5 に示す解析条件を設定し、図 - 5 に示す解析モデルを用い、3 次元の FEM 温度解析ソフトにより解析を行った。解析の結果、比較的低温の低い床版縁端部のコンクリートは、図 - 6 に示すような温度履歴があることが分かった。

(3) コンクリートの有効材齢の計算

本工事において、コンクリート打設後 16 時間での有効材

表 - 5 温度解析の条件

項 目	設 定 条 件
解析モデル	セグメント実物の 1/4
養生条件	メタル枠の外側に厚さ 50 mm の発泡スチロールを貼り、床版上面に断熱養生シートを覆う
外気温	2 ~ 10 °C
コンクリートの初期温度	10 °C
セメント種類	早強ポルトランドセメント
単位セメント量	427 kg/m <sup>3</sup>
断熱温度上昇式	オリ建式 <sup>3)</sup>

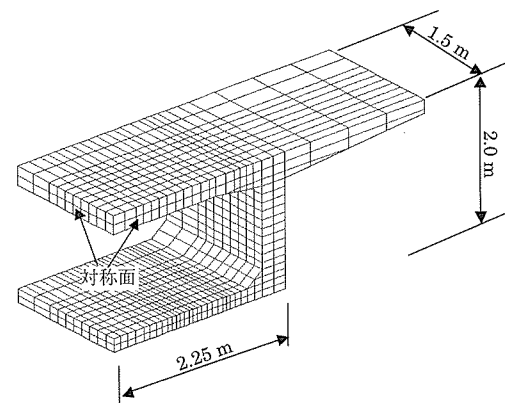


図 - 5 3次元 FEM 温度解析モデル

齢は、図 - 6 に示す温度履歴に基づいて式(1)により計算され、0.57 日となった。

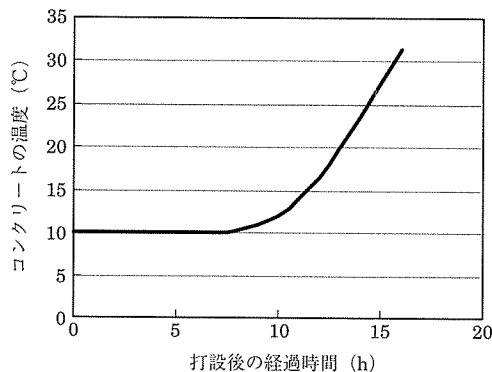


図 - 6 上床版縁端部コンクリートの温度解析値

(4) コンクリート初期強度の計算と照査

0.57 日の有効材齢および 60 N/mm<sup>2</sup> の配合強度を式 (2) に代入し計算した結果、打設後 16 時間で床版縁端部のコンクリート圧縮強度は 18 N/mm<sup>2</sup> であり、脱型強度 14 N/mm<sup>2</sup> を超えた。よって、本工事において、60 N/mm<sup>2</sup> の配合強度および 427 kg/m<sup>3</sup> の単位セメント量が妥当であると判断した。

3.4 試験練りにより配合設計の確認

最終的にコンクリートの配合を決めるために、表 - 4 に示すコンクリートの配合に対して試験練りを行い、そのフレッシュ性状、温度履歴および初期強度を確認し、必要な場合コンクリートの配合を調整することがある。

試験練りには、冬期断熱養生条件を模擬するため、コンクリートの練上がり温度を冬期のコンクリートの温度に調整し、さらに、圧縮強度用テストピースを温度履歴の設定ができる養生槽に、解析で得たコンクリートの温度履歴と同じ温度履歴で養生することが望ましい。しかし、本工事に使用する生コンクリート工場の設備の制約上、コンクリートの温度を調整できなかった。また、温度設定ができる養生槽の代わりに、現場で冬期断熱養生に使用する発泡スチロールを用いた箱（断熱養生箱）の中で圧縮試験用テストピースを養生した。次項に試験練りの結果を示す。

(1) 試験練りコンクリートの温度上昇

断熱養生箱にあるテストピースの温度を図 - 7 に示す。図 - 7 より、コンクリートの温度は、解析の時設定した冬期のコンクリート温度 (10 °C) より高く、配合強度を決める時の解析温度より高くなっていた。

(2) 試験練りコンクリートの強度発現

試験練りコンクリートの圧縮強度を表 - 6 に示す。同表より、コンクリートの材齢 28 日の圧縮強度は 65.0 N/mm<sup>2</sup>

表 - 6 試験練りコンクリートの圧縮強度

材齢	養生方法	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		測定値	計算値
18 時間	断熱養生箱中	26.8	25.4
28 日	20 °C 水中	65.0	65.0

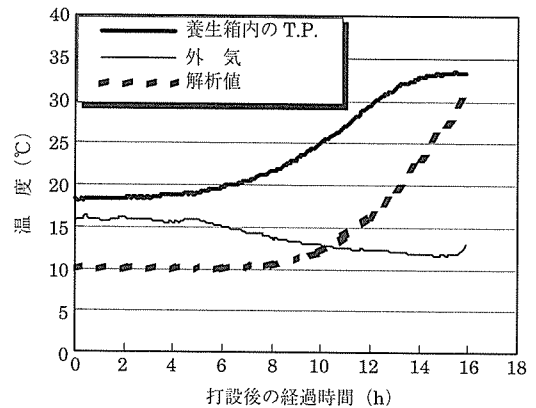


図 - 7 試験練りコンクリートの温度履歴

となり、設計配合強度 60 N/mm<sup>2</sup> を上回っている。また、コンクリートの材齢 18 時間の圧縮強度は、コンクリートの練上がり温度が高かったため、脱型強度を大きく上回ったが、測定したコンクリートの温度と材齢 28 日の圧縮強度から式 (1)、式(2)により計算した圧縮強度とほぼ同じである。

3.5 施工時の計測による配合設計の検証

前述の冬期断熱養生を考慮したコンクリートの配合設計法の妥当性を確認するために、実際の施工現場で図 - 8 に示すように、セグメントの床版縁端部に温度センサーを設置し、コンクリートの温度を測定しながら、同じ温度で圧縮試験用テストピースを温度追従養生し、さらに、コンクリートの圧縮強度を測定した。以下は検証の結果を紹介する。

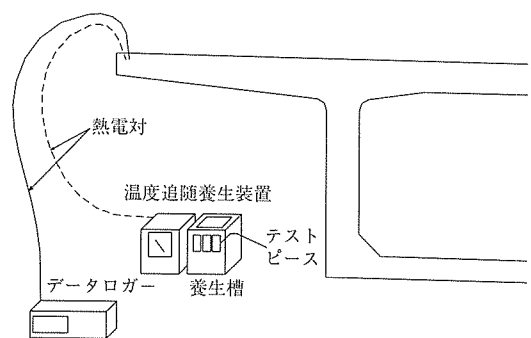


図 - 8 温度測定箇所および温度追従養生の概要

(1) コンクリート温度上昇の検証

施工現場で測定した床版縁端部のコンクリートの温度は、図 - 9 に示すように、3次元 FEM の温度解析値とほぼ一致している。したがって、コンクリートの配合設計には、この温度解析値を用いてコンクリートの有効材齢を計算し、配合強度を決めることが有効であると考えられる。

(2) コンクリート強度発現の検証

施工現場でセグメント床版の縁端部のコンクリート温度を追従して養生されたテストピースの圧縮強度は、表 - 7 に示すように、脱型強度を満足し、FEM 温度解析で得た温度履歴を用いた圧縮強度の計算値とおおむね一致している。これらの圧縮強度の結果から、再度に本工事に使用したコ

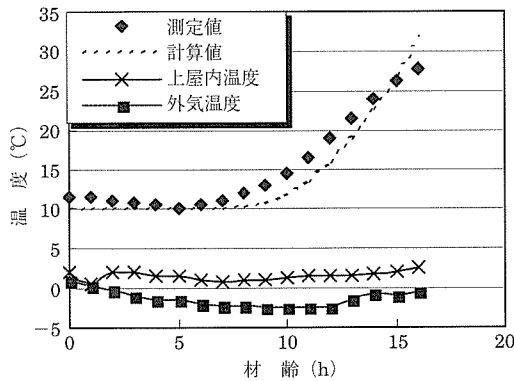


図-9 上床板縁端部のコンクリート温度における測定値と解析値との比較

表-7 施工現場コンクリートの圧縮強度

材齢	養生方法	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		測定値	計算値
16時間	温度追従養生	21.7	20.2
28日	20℃水中	67.1	67.1

ンクリートの配合設計法の正確性が確認できた。

以上の施工現場でのコンクリート温度履歴とコンクリートの圧縮強度の検証結果により、本文に提案した断熱養生工法におけるコンクリートの配合設計法の正確性が確認され、富田山城線高架橋工事のセグメント製作に断熱養生工法の採用も決定された。

#### 4. おわりに

以上の冬期断熱養生工法におけるコンクリートの配合設計法について、下記の設計要点が得られる。

- ①設計基準強度によりコンクリートの仮配合強度を決定する。
- ②仮配合のコンクリートを用いる部材に対して、3次元

のFEM温度解析を行い、構造体の中で温度上昇が低い部位のコンクリート温度履歴から脱型時（本工事ではコンクリートの打設後16時間）での有効材齢を計算する。

- ③コンクリートの配合強度および有効材齢を用いて脱型時のコンクリートの圧縮強度を計算する。
- ④計算された圧縮強度が脱型強度と大きく異なった場合、仮配合の配合強度または単位セメント量を調整し、以上の解析および計算を再度行う。
- ⑤試験練りにより、コンクリートのフレッシュ性状を確認し、強度試験用テストピースを部材の解析温度と同じ温度で養生し、圧縮強度を確認する。

また、富田山城線高架橋工事に断熱養生工法を採用することにより、蒸気養生を省略することができ、蒸気養生設備の投資、養生時の重油消費とCO<sub>2</sub>の排出はなくなり、また冬期におけるセグメント製作工程も遵守することができた。さらに、内部拘束による温度ひび割れの抑制およびコンクリート品質の向上などの効果も確認された。

#### 謝 辞

今回の断熱養生工法の試験、解析および施工において多大なご指導を頂いた関係各位と、積極的に断熱養生の技術提案を受け入れていただいた四日市建設部に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Comite Euro-International Du Beton; CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, pp.62, 1990
- 2) Comite Euro-International Du Beton; CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, pp.51, 1990
- 3) 小林俊秋, 呉 承寧, 大熊 章; 若材齢における高強度コンクリートの断熱温度上昇に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第22巻, 第2号, pp.751-756, 2000

【2004年3月8日受付】