

蒸気養生の給熱効果に対する定量評価

興建産業（株） 正会員 ○田所 雄治，曾根 正夫
 （株）リボーンコンサルティング 正会員 永吉 哲郎
 東京都立大学名誉教授 フェロー 國府 勝郎

1. はじめに

プレキャストコンクリート製品（以下、製品）の製造では、型枠の効率的使用と製品の早期出荷を目的として常圧蒸気養生（以下、蒸気養生）が行われている。製品の品質確保だけではなく、エネルギー消費の抑制とカーボンニュートラル（CN）もしくはグリーントランスフォーメーション（GX）への取り組みのために、蒸気養生中のコンクリート温度の経時変化および断面の温度分布を推定するプログラムを開発¹⁾している。このプログラムを用いれば、蒸気養生の温度条件に従った給熱量（給熱指標）やコンクリート品質を支配する断面内の温度分布と積算温度（熱応答指標）などを把握することができる。本文では、蒸気養生の給熱効果を定量的に示して、蒸気養生の最適な条件とコンクリート品質を総合的に評価する方法について報告する。

2. 蒸気養生の給熱効果の評価指標

養生中のコンクリートの温度分布は、一次元の熱伝導方程式を用いた蒸気の伝導熱とコンクリートの自己発熱とを合成する方法で推定¹⁾している。蒸気養生の給熱効果は、気温以上の水和環境に対するものであるから、図1に示すように、蒸気養生槽内が練混ぜ時の気温を超える値と時間増分 Δt との積を累積して給熱指標とした。コンクリートの熱応答指標は、推定計算に基づく積算温度²⁾から気温以下の範囲に相当する値（以下、BoM：Base of Maturity）を減算して表した。

この熱応答指標を給熱指標で除した百分率を“給熱効率”とした。給熱効率の計算式を式(1)に示す。なお、給熱効率を計算する対象時間の範囲は、練混ぜ直後から養生槽内での保管期間を含む脱型時までとした。

$$\text{給熱効率} = \text{熱応答指標} / \text{給熱指標} = (\text{コンクリートの積算温度} - \text{BoM}) / \text{給熱指標} \times 100\% \quad (1)$$

3. 給熱効率による評価

蒸気養生は、脱型時の強度および出荷材齢時の設計基準強度を確保するために行う促進養生である。したがって、それらの要求性能を実績として満足するコンクリート配合であること、また脱型に必要な積算温度を確保することを前提条件として、給熱効率を用いて蒸気養生の条件を評価した。

平打ち型枠を使用した部材断面厚さ 220mm の板状小型製品に対して、練混ぜ直後から脱型時までを 14 時間、気温を 25℃、一定とし、最高温度と保持時間を任意に設定した蒸気養生条件で、製品断面のコンクリート温度分布を推定および給熱効率を試算した。その結果を図2、表1に示す。

キーワード プレキャストコンクリート製品，蒸気養生，積算温度，給熱効率

連絡先 〒183-0026 東京都府中市南町 5-38-3 興建産業(株) TEL 042-365-3331

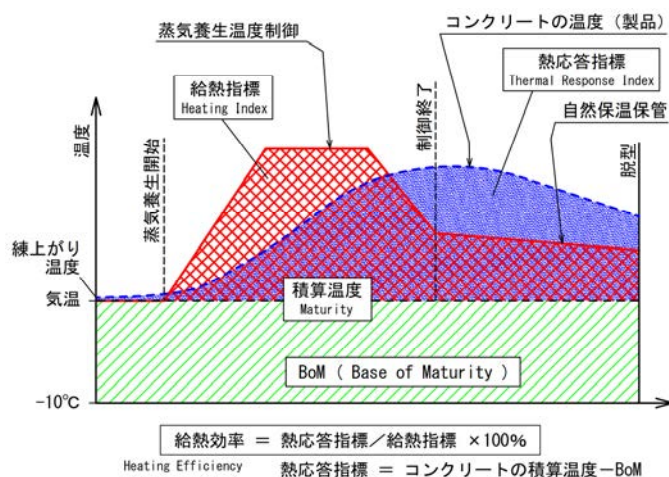


図1 給熱効果の考え方と給熱効率

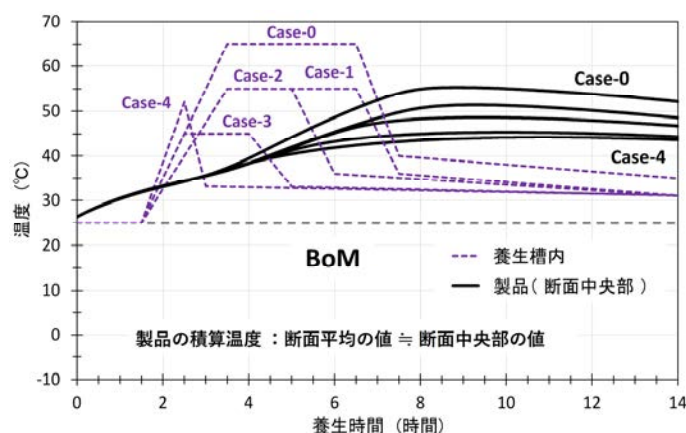


図2 製品断面のコンクリート温度分布の推定結果

なお、対象製品のこれまでの製造実績から、脱型に必要な積算温度は 650 °C・時間とした。

試算結果から、最適な蒸気養生条件は、脱型に必要な積算温度を確保でき、給熱効率が最も高い、Case-4 と考えられる。給熱指標と給熱効率との関係および製品積算温度との関係を図 3 に示す。給熱指標の増加にともない、製品の積算温度は増加する一方で、給熱効率は減少している。一般的な蒸気養生条件として考えられている、製品強度を優先した Case-0 と比較すると、Case-1～4 は、エネルギー消費を抑制する方向の蒸気養生条件であると評価できる。このように、蒸気養生の効果を給熱効率で定量的に評価することで、蒸気養生条件の最適化を図ることができ、エネルギー消費を抑制できるものと考えられる。なお、蒸気養生の条件は、強度発現および給熱効率のほか、耐久性に関する指標への影響も考慮して、適切に定める必要がある。

4. 実測温度による検証

給熱効率が最も高かった Case-4 の蒸気養生条件で製造した板状小型製品（平打ち型枠、断面部材厚さ 220mm）の実測温度を図 4 に示す。製品の積算温度は 662°C・時間で、脱型に対する安全率は 102%，給熱効率は 191%（BoM:490°C・時間、給熱指標:90°C・時間、熱応答指標:172°C・時間）であり、製品断面のコンクリート温度分布とともに、概ね妥当な結果を与えることができた。また、製品の脱型に不具合はなく、円柱供試体による所要の圧縮強度も表 2 に示すように、脱型時で 12N/mm² 以上、出荷材齢 14 日で 30N/mm²（設計基準強度）以上であった。

給熱効率による評価を基に製品を製造し、温度測定した結果、Case-4 の条件は、対象とした製品と気温において、エネルギー消費を抑制した蒸気養生条件であることが確認できた。

5. まとめ

蒸気および養生設備の保温による給熱量に対する、蒸気養生によるコンクリート製品への熱伝導と自己発熱との合成温度から計算される積算温度の割合を給熱効率として表し、蒸気養生の効果を定量的に評価した。その結果、蒸気養生条件のコンクリート品質に対する検討を行うことができ、また蒸気養生の最適化を図ることで、エネルギー消費の抑制に繋げることができる。

参考文献

1) 田所雄治ほか：蒸気養生におけるコンクリート断面の温度分布の推定，第 77 回セメント技術大会講演要旨，2023
2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，p.167，2018

表 1 製品の積算温度および給熱効率の試算結果

試算 Case	蒸気養生条件		試算結果			
	最高温度 と保持時間	積算温度 断面平均	BoM	給熱 指標	熱応答 指標	給熱 効率
	(°C)－(時間)	(°C・時間)				
0	65－3.0	780	490	269	290	108
1	55－3.0	744	490	196	254	130
2	55－1.5	726	490	163	236	144
3	45－1.5	699	490	117	209	179
4	52－0.0	688	490	99	198	199

※ 製品脱型に必要な積算温度 650 (°C・時間)

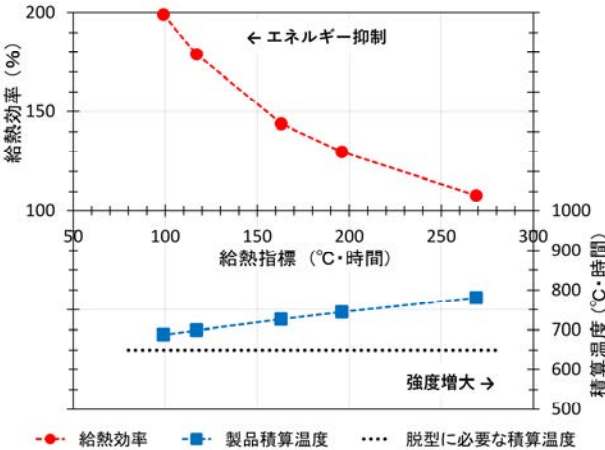


図 3 給熱指標と給熱効率との関係
および製品積算温度との関係

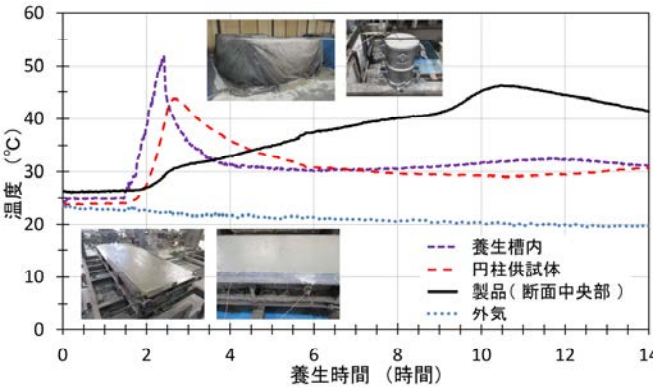


図 4 板状小型製品の実測温度

表 2 圧縮強度 (N/mm²)

No.	脱型時	材齢14日
1	14.0	38.6
2	14.5	39.2
3	13.8	36.8
平均	14.1	38.2