

蒸気養生で製造されるコンクリートの温度上昇特性

オリエンタル白石(株)	技術研究所	正会員	中村 敏之
オリエンタル白石(株)	関東工場		北澤 利春
オリエンタル白石(株)	福岡工場		前田 道孝
オリエンタル白石(株)	技術研究所	正会員	東 洋輔

Abstract : The pre-tensioned girder manufactured by steam curing receives a high temperature in early stages, therefore, heating of concrete is accelerated, high strength is obtained early. On the other hand, quality, such as long age strength and durability, deteriorates. In order to satisfy manufacture efficiency and quality, the temperature setting of steam curing becomes important. However, temperature increase characteristics of steam curing differ as compared with general curing. Therefore, temperature setting of steam curing is performed experientially. Then, we conducted the experiment about the temperature setting of steam curing. The experimental result was verified by measuring the concrete temperature of pre-tensioned girder that was manufactured of a summer and winter. Temperature increase characteristic of the concrete manufactured by steam curing has been grasped quantitatively.

Key words : Pre-tensioned girder , Steam curing , Temperature increase characteristics

1. はじめに

プレテンション桁¹⁾などのPC工場製品が蒸気養生で製造される場合、高温の蒸気によりコンクリートの発熱が促進されることから早期に強度が得られる。そのことから、翌日に脱型してプレトレスが導入でき、効率的な1日サイクルの製造が可能となる。一方で、凝結時に蒸気による高温履歴を受けることから、ペースト硬化体が粗となり、長期強度や耐久性などの品質が低下するといわれている。また、コンクリート温度が高い状態で脱型するため、急冷により温度ひび割れが生じることがある。そのため、2012制定コンクリート標準示方書[施工編]²⁾では、工場製品を促進養生する場合、コンクリートに有害な影響を及ぼさないように、成形後ただちに蒸気を通したり、急速に温度を上げたり、高い温度で養生したり、脱型時に急冷したりしてはならない、と記述している。したがって、効率的な製造の中で、より品質の高いコンクリートを製造するためには、プレストレス導入時や各施工段階で必要な強度が得られる範囲で、できるだけ低い温度で適切な蒸気養生の設定をすることが望ましい。しかしながら、現状の製造は強度発現を重視した経験的な蒸気の温度設定が行われており、安全側として高めの温度が設定されている場合が多い。このように定性的に温度設定をせざるを得ない理由に、蒸気養生中のコンクリート温度は発熱に蒸気の促進が加味された特殊な温度履歴を示し、その温度上昇特性が明確となっていないことが挙げられる。温度上昇特性が明確となれば、事前に温度応力解析を行うことができ、温度履歴から強度を予測したり、温度ひび割れの対策などができる可能性がある。

そこで、プレテンションスラブ桁とプレテンションT桁を対象として、複数の蒸気養生条件を要因としたコンクリート試験体を用いた実験を行い、コンクリート温度の実験値から逆解析することで、温度上昇特性値を求めることとした。あわせて、それぞれの試験体の圧縮強度と温度の関係を求めることとした。そのうえで、実物の蒸気養生で製造するプレテンション桁のコンクリート温度を測定して、解析値と比較することにより、求めた温度上昇特性値の妥当性を確認した。

2. 温度上昇特性に関する実験と解析

2.1 実験概要

図 - 1 に実験要因を示す。要因は外気温 (打込み温度), 前養生時間, 温度上昇速度および最高温度などの蒸気養生設定パターンを変化させた 9 種類 (No.1~9) とした。No.1~3 は最高温度を 50 で一定として打込み温度を変化させ, No.4~6 は打込み温度を 20 で一定として最高温度を変化させる標準的なパターンとした。対して, No.7~9 は温度上昇速度や促進時間などを通常はあまり適用しないパターンとした。実験はそれぞれの要因でコンクリート試験体を製造し, 温度履歴と翌日強度 (練上りから 18 時間後) を測定した。図 - 2 および写真 - 1 に試験体の形状と温度測定位置を示す。試験体は実製品の一部を切り出したモデルとし, 2 面は鋼製型枠面を, 4 面は厚さ 200mm の発泡スチロールを配置することにより, コンクリートが連続となっていることを再現した。コンクリートは試験体中央に設けた 200×200mm の孔に打込むものとした。コンクリート温度は熱電対を用いて中心と鋼板表面から 50mm の位置を測定した。表 - 1 に使用したコンクリートの配合を示す。通常に工場で使用している,

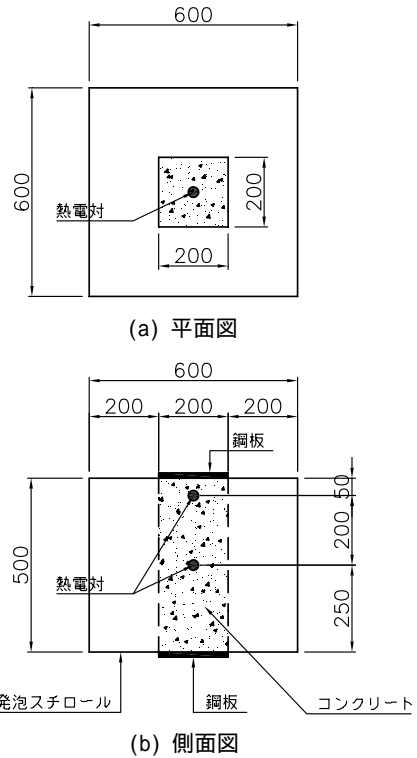


図 - 2 試験体の形状



写真 - 1 試験体

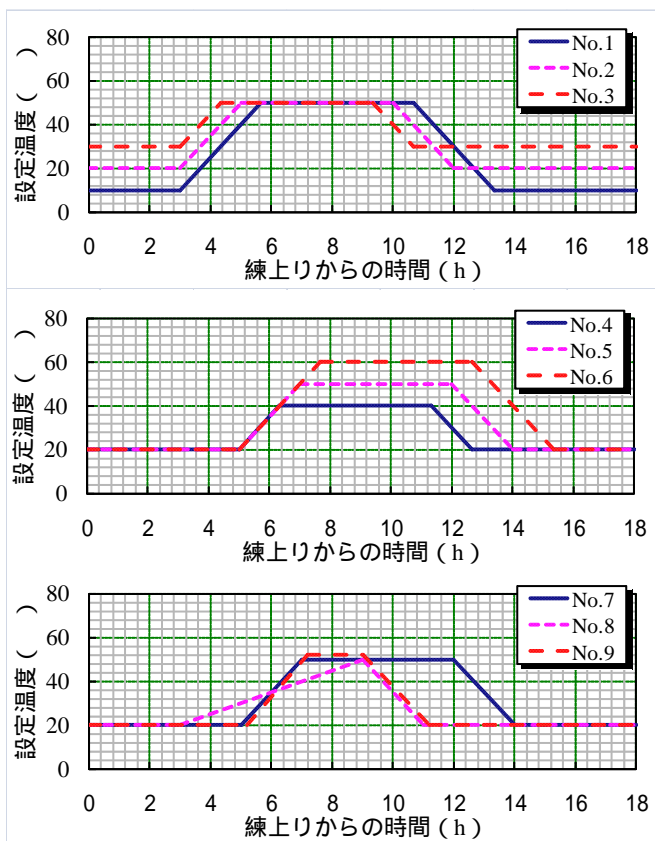


図 - 1 実験要因

表 - 1 コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)				
						W	C ¹	S	G	SP ²
50	20	8.0	4.5	36.0	39.0	154	428	677	1024	2.4

1 早強ポルトランドセメント

2 ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

早強ポルトランドセメントを用いたプレテンション桁用の設計基準強度 50N/mm^2 の配合とした。養生温度は各要因毎に恒温恒湿槽で再現するものとした。相対湿度はすべての要因で蒸気設定パターンにおける温度上昇前が 60%、温度上昇後が 95%とした。圧縮強度用テストピースは 100×200 の鋼製モールドに採取し、封緘して試験体とともに恒温恒湿槽で養生した。No.4~9 においては、別途のテストピースを 100×200 の鋼製モールドに採取し、試験体中心のコンクリート温度をサンプルとした温度追従養生を行った。

2.2 解析概要

各要因において、汎用の温度応力解析ソフトを用いて、実験で得られた温度データをもとにそれぞれの養生条件の逆解析を行い、断熱温度上昇量を求めた。断熱温度上昇の回帰式は「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008³⁾」(以下、ひび割れ指針)の提案する式(1)に基づいたものとした。

$$Q(t) = Q [1 - \exp\{- (t - t_0)^S\}] \quad (1)$$

ここに、 Q : 断熱温度上昇量()、 t : 材齢(日)、 Q : 終局断熱温度上昇量()、 t_0 : 発熱開始材齢(日)
 S : 断熱温度上昇速度係数、 S : 温度上昇速度係数

解析モデルは図 - 3 に示す 1/2 モデルとした。コンクリートの熱特性はひび割れ指針の値を用い、熱伝導率 2.7W/m 、比熱 1.15kJ/kg 、密度 2400kg/m^3 とした。境界条件は発泡スチロール部は断熱とし、鋼板部は既往の研究⁴⁾から、飽和蒸気が熱の伝達を促進することを考慮して、熱伝達率を 18W/m^2 とした。これらの条件を用いて、式(1)に関わる温度上昇特性値を変化させて、コンクリート温度の解析値が実験値と一致するまでパラメータの同定を行った。

2.3 温度上昇特性

終局断熱温度上昇量 (Q) はコンクリートの最大到達温度に関わる特性値であり、ひび割れ指針では単位セメント量と打込み温度を係数として求めることとしている。したがって、水和の発熱が主に影響すると考えられる。また、発熱開始材齢 (t_0) は蒸気による促進を開始する前の時点であると考えられる。したがって、これらには蒸気の促進の影響を大きくは受けないと考え、ひび割れ指針の早強ポルトランドセメントを使用した標準値 (式(2)、式(3)) が適用できると仮定した。

$$Q = 15.9 + 0.135 \times Wc + (-0.106 + 0.0000257 \times Wc) \times T_a \quad (2)$$

$$t_0 = (0.607 - 0.000388 \times Wc) \times \exp\{- (0.0158 + 0.000188 \times Wc) \times T_a\} \quad (3)$$

ここに、 Wc : 単位セメント量(kg/m^3)、 T_a : 打込み温度()

一方、断熱温度上昇速度係数 () と温度上昇速度係数 (S) は温度曲線の勾配や立ち上がりに関わる特性値であるため、蒸気による促進が大きく影響すると考えられる。ひび割れ指針では S は単位セメント量と打込み温度によるものとしている。また、 S は低熱ポルトランドセメントにおいて、1 以下

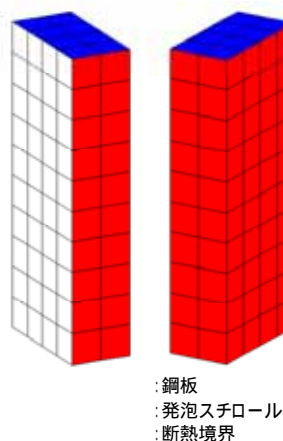


図 - 3 解析モデル

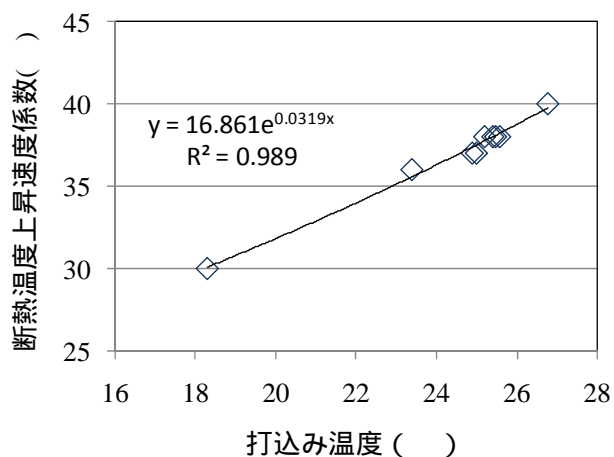


図 - 4 断熱温度上昇速度係数と打込み温度の関係

の係数として温度上昇の遅延を近似するものとしている。したがって、は各要因の実験値と解析値が一致する各々の値を得たうえで、単位セメント量は固定であることから、打込み温度のみの関数として回帰することとした。図 - 4 に断熱温度上昇速度係数と打込み温度の関係を示す。S は促進を近似するものとして 1 以上の固定値とすることとした。この仮定をもとに式(4)、式(5)を用いて解析を行った結果、図 - 5 に示すようにコンクリート内部、表面付近とも解析値と実験値がよく対応した関係が得られた。

$$= 16.861 \times \exp(0.0319 \times T_a) \quad (4)$$

$$S = 3.1 \quad (5)$$

ここに、 T_a : 打込み温度()

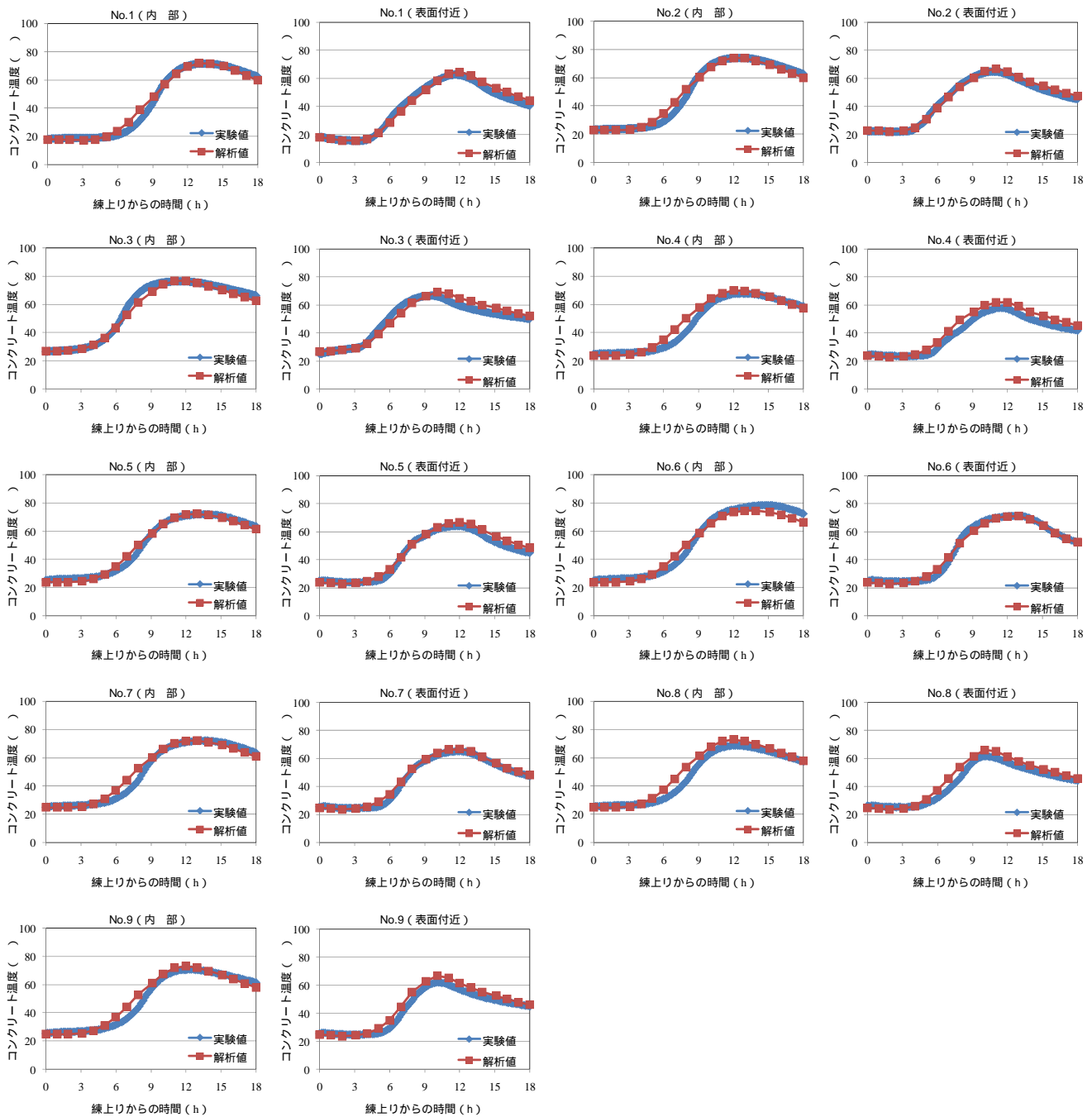


図 - 5 実験値と解析値の関係

2.4 圧縮強度と温度の関係

圧縮強度と温度の関係において、蒸気養生で製造されるコンクリートの翌日程度の初期強度と積算温度は直線関係にあるといわれている。図 - 6 に実験のコンクリートの温度履歴から求めた練り上がりから 18 時間後における積算温度と圧縮強度の関係を示す。積算温度は試験体とともに恒温恒湿槽で封緘養生したテストピースは養生温度から、温度追従養生をしたテストピースは試験体中心のコンクリート温度から、それぞれを算出した。温度追従養生をしたテストピースの圧縮強度と積算温度はどれも大きい結果となっている。これは封緘養生のテストピースと温度追従養生のテストピースがサンプルとした試験体の大きさの違いにより、温度履歴が異なることによると考えられる。しかしながら、圧縮強度と積算温度は相関があり、どのような温度履歴でも積算温度で圧縮強度を予測できるものと考えられる。本実験の範囲では、圧縮強度と積算温度の関係から直線回帰により式(6)が得られた。

$$= 0.032 \times M + 19.88 \quad (6)$$

ここに、 σ_c : 圧縮強度(N/mm²)

M : 積算温度(°C・h)

表 - 2 に式(6)より算出した予測値と実験値の比較を示す。最大の誤差は 3.6N/mm² (6%) であり、使用材料と配合が同一の条件

であれば、予測式として十分に適用が可能であると考えられる。したがって、各PC工場において、一般にはプレテンション桁に使用する材料と配合は同一であるため、プレストレス導入時の圧縮強度と積算温度のデータを多く蓄積し、それを回帰することで、精度の良い予測式が確立できると考えられる。また、図 - 6 に示すように、本実験において、プレストレス導入時の配合強度が 40N/mm² であったと仮定すると、式(6)から必要な積算温度 659 °C・h が算出できる。先述の蒸気養生下での断熱温度上昇式を用いた温度解析を実施することで、必要強度が得られる蒸気パターンが定量的に設定できる。

3. 実製品による検証

要素実験と逆解析により得られた断熱温度上昇式の妥当性を確認するため、実製品のコンクリート温度の実測値を用いて検証した。表 - 3 に対象とした製品の主な諸元を示す。温度環境や形状の違いを考慮して、冬季および夏季に製造したプレテンションスラブ桁、プレテンションT桁の4種類とした。図 - 7 に温度の測定点を示す。スラブ桁は中間横桁の中心と表面付近、T桁はスパン中央におけるウェブ中心とフランジ端部とした。図 - 8 に実測値と解析値の関係を示す。形状や打込み温度、単位セメント量の違いに関わらず、実測値と解析値がよく対応している。このことから、本実験で求めた蒸気養生下の断熱温度上昇式は、設計基準強度50N/mm²のプレテンション桁に対し、適用可能であることがわかった。

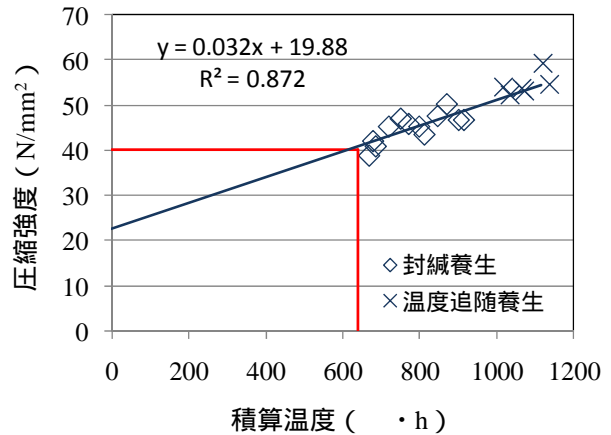


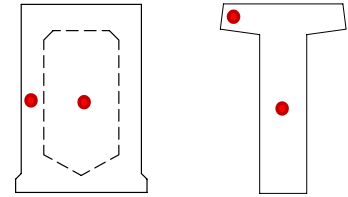
図 - 6 圧縮強度と積算温度の関係

表 - 2 積算温度から予測した圧縮強度

試験体	養生方法	積算温度 (°C・h)	圧縮強度(N/mm ²)		
			実験値	予測値	誤差
No.1	恒温恒湿槽	719	45.2	42.9	2.3
No.2		811	43.6	45.8	-2.2
No.3		915	46.7	49.2	-2.5
No.4		679	42.1	41.6	0.5
No.5		752	47.0	43.9	3.1
No.6		871	50.1	47.8	2.3
No.7		772	46.0	44.6	1.4
No.8		669	38.8	41.3	-2.5
No.9		686	40.8	41.8	-1.1
No.4	温度追従養生	1017	54.0	52.4	1.6
No.5		1065	53.7	54.0	-0.2
No.6		1119	59.3	55.7	3.6
No.7		1135	54.6	56.2	-1.6
No.8		1070	53.1	54.1	-1.0
No.9	1036	52.4	53.0	-0.7	

表 - 3 検証した実製品の諸元

製造時期	種別	桁長 (m)	桁高 (mm)	設計基準強度 (N/mm ²)	単位セメント量 (kg/m ³)	打込み温度 (°C)
冬季	スラブ桁	24	1,000	60	467	19
	T桁	23	1,200	50	428	12
夏季	スラブ桁	14	550	50	395	34
	T桁	24	1,300	50	395	33



(a) スラブ桁 中間横桁 (b) T桁 スパン中央

図 - 7 実製品の温度測定位置

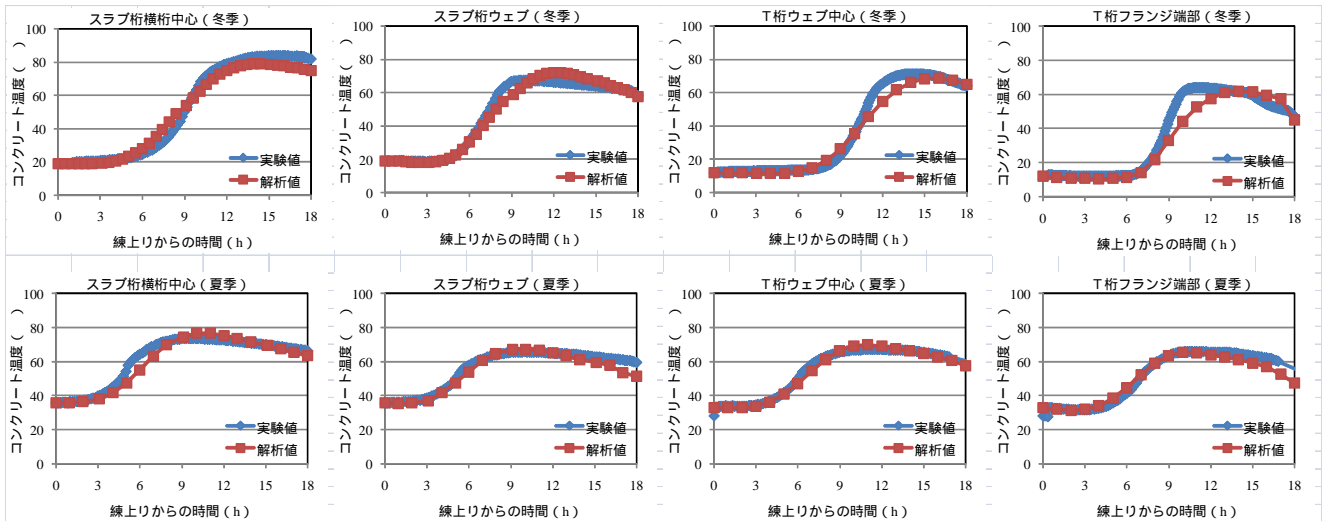


図 - 8 実製品における実測値と解析値

4. まとめ

蒸気養生で製造されるコンクリートの温度上昇特性を要素実験から得られた温度履歴から逆解析し、蒸気養生下での断熱温度上昇式を求めた。さらに実製品に対し、解析による再現が可能であることを検証した。また、コンクリートの材料と配合が同じであれば、翌日脱型時における圧縮強度と積算温度は比例関係にあることがわかった。このことから、事前に温度解析で得られる温度履歴から積算温度を計算し、プレストレス導入時に必要な強度予測値を満足する蒸気設定をすることができ、効率的かつ経済的な製造が可能となると考えられる。また、蒸気養生で製造される場合は、たとえ断面形状が小さくても、蒸気促進の影響からコンクリート温度が高くなり、温度ひび割れが懸念される場合がある。その際は、事前に提案する断熱温度上昇式を用いた解析で精度よくひび割れ指数などを予測でき、その対策を講じることができる。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：道路橋用橋げた 設計・製造便覧，2004.6
- 2) 土木学会：2012制定コンクリート標準示方書[施工編]，2013.3
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，2008.11
- 4) 遠藤友紀雄，田代藤雄，森本博昭，小柳 洽：蒸気養生下におけるコンクリートの諸特性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，1996