

# 報告 蒸気養生を不要としたプレキャストコンクリート製品の製造

中村 敏之\*1・井村 尚則\*2・中村 憲生\*3・二井谷 教治\*4

**要旨:** 一般にプレキャストコンクリート製品の製造は蒸気養生によることが多いが、A重油の燃焼にともなう温室効果ガスを排出するため、使用量を削減することが低炭素化につながる。また、製造工場においても働き手不足は課題であり、さらなる生産性の向上が望まれる。そこで、低炭素化と生産性向上を目的に、硬化促進剤を添加した締固めを必要とする高流動コンクリートを用いた製造方法を検討した。その結果、蒸気養生を行わずに従来と同等以上の品質を有すること、打込みおよび締固めが簡便になることで作業人員が削減できることを確認した。それを踏まえて実製品に適用し、製造管理に関わる温度と強度の関係を整理した。

**キーワード:** プレキャストコンクリート製品、硬化促進剤、締固めを必要とする高流動コンクリート

## 1. はじめに

近年、建設工事においても地球温暖化に対する低炭素化や年々減少傾向にある生産人口に対する生産性向上が求められている。プレキャストコンクリート製品(以下、PCa製品)の活用は生産性向上に有効であり、プレテンション方式PC桁の場合、蒸気養生を施すことによって、十数時間でプレストレスの導入に必要な圧縮強度を得ることができるため、効率的な1日サイクルの製造を可能とする。しかし、蒸気養生はA重油を燃焼させることから温室効果ガス(以下、CO<sub>2</sub>)を排出しており、工場製造における燃料消費量の多くをA重油が占めている。そのため、A重油の使用量を削減する製造方法を構築することで低炭素化への貢献となると予想される。一方、PCa製品の製造工場においても働き手不足の課題は生じており、さらなる省力化・省人化は必要と考えられる。

そこで本稿では、工場において製造されるPCa製品を対象に、低炭素化と生産性向上へ寄与する製造方法の検討とそれを踏まえた実際のPCa製品の製造および管理方法に関する検討概要を報告する。

## 2. 検討概要

低炭素化に関しては、蒸気養生による早期の強度促進の代替として、JIS A 6204に適合したコンクリート用硬化促進剤(以下、ACX)を活用して、蒸気養生を行わずに所定の強度を満足する方法を検討した。一方、生産性向上に関しては、工場で製造するPCa製品の多くが鋼製型枠を用いるため、外部振動機のみによる締固めが可能であれば棒状パイプレータによる締固め作業が削減できる。そこで、近年注目される軽微な締固めで充填を可能とする締固めを必要とする高流動コンクリートをベースとし、ACXの添加による強度発現の効果を実験的に確認

した。

## 3. 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計

### 3.1 使用材料および配合

表-1に使用材料を、表-2に既存のスランブ12cmの配合およびスランブフロー65cmの自己充填を有する高流動コンクリートの配合と、これらを参考に想定したスランブフロー45cmの締固めを必要とする高流動コンクリートの配合を示す。スランブ12cmの配合はこれまでPCa製品に多くの実績があり、スランブフロー65cmの配合は、同材料を用いて、土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」<sup>1)</sup>に準じて配合設計したものである。想定したスランブフロー45cmは外部振動機による強い振動によって締め固めるため、材料分離抵抗性を確保するには適度なセメント量が必要となる。そのため、スランブフロー45cmの水セメント比はスランブフロー65cmと同様に36%とした。

表-1 使用材料

練混ぜ水(W)	上水道水
セメント(C)	早強ポルトランドセメント (比重3.14)
細骨材(S)	硬質砂岩砕砂 (比重2.64, 粗粒率2.68, 実積率55.6%)
粗骨材(G)	硬質砂岩砕石 (比重2.66, 粗粒率6.66, 実積率61.0%)

表-2 各流動性の配合

SLorSLF	W/C	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
cm	38	42.0	153	403	747	1039
45	36	49.5	160	444	854	878
65	36	51.2	170	472	858	824

\*1 オリエンタル白石株式会社 技術研究所 (正会員)

\*2 オリエンタル白石株式会社 大阪支店工事事務土木工事チーム

\*3 オリエンタル白石株式会社 滋賀工場管理課

\*4 オリエンタル白石株式会社 本社技術本部 博士(環境学) (正会員)

### 3.2 材料分離抵抗性の確認

#### (1) 概要

対象とした PCa 製品は設計基準強度が 50N/mm<sup>2</sup> の高強度コンクリートを使用することから水セメント比が小さく、一般に材料分離抵抗性は高い傾向である。しかし、外部振動機による強い振動を与える状況下では、それに応じた適切な材料分離抵抗性を有するか不明である。そこで、想定した配合の締固めを必要とする高流動コンクリートを幅 300mm、高さ 1,000mm、長さ 5,000mm の壁状の鋼製型枠を用いて打込みおよび外部振動機による締固めを行い、粗骨材の沈降を観察することで材料分離抵抗性を実験的に確認した。

#### (2) 実験方法および結果

コンクリートは実機ミキサで 0.8m<sup>3</sup> を 2 バッチ練り混ぜ、2 層に分けて打ち込んだ。スランプフローは 1 バッチ目 (下層 50cm) で 46cm、2 バッチ目 (上層 50cm) で 39cm であった。外部振動機は両側の側枠それぞれに 1 台ずつを端部から 1m の位置に千鳥配置した。締固めは外部振動機のみによるため、過剰になることも想定されることから、各層それぞれで打込み開始から 15 秒後に振動を開始し、打込み完了後、下層は 90 秒後、上層は 120 秒後まで、目視による締固め完了より長い振動を継続した。写真-1 に硬化後の側面を洗い出して露出させた粗骨材の分布状況を示す。過剰な締固めを行った条件にも関わらず、粗骨材の沈降による不均一性は確認されなかった。このことから、想定した配合はスランプフロー 45cm で管理することで、外部振動機のみで締め固め、ある程度の過剰な締固めをした場合でも材料分離が生じる

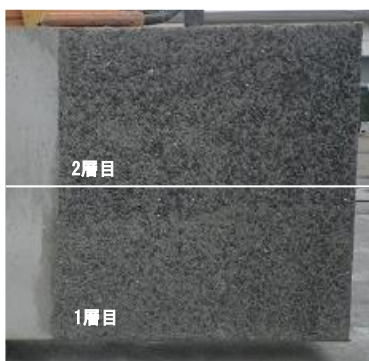


写真-1 粗骨材の分布状況



写真-2 締固めを必要とする高流動コンクリート

ことなく、充填が可能であることを確認した。

#### (3) 実部材による確認

決定した配合を用いて、実物大の PCa 製品 (ポステンション方式中空床版桁) を製造し (写真-2)、外観や生産性向上の効果を確認した。その結果、骨材の沈降による不均一性も認められないことを確認した。また、従来のスランプで管理するコンクリートで製造する場合は、棒状バイブレータによる締固め作業で 3 人程度要するが、締固めを必要とする高流動コンクリートを用いることで、外部振動機のみで充填が可能であった。ただし、締固め後は作業員 1 名によって棒状バイブレータを用いて内部気泡の除去を行った。このことから、本配合での締固めを必要とする高流動コンクリートでの PCa 製品の製造が可能であり、締固め作業を大きく削減できることで生産性向上に寄与することを確認した。

### 4. 蒸気養生を不要とした製造方法の検討

#### 4.1 概要

従来のように蒸気養生で製造する場合、蒸気養生の開始時は凝結始発程度以降としないと表層品質に悪影響を及ぼすことがある<sup>2)</sup>。しかしながら、冬期に製造する場合は凝結が大幅に遅延するため、仕上げ完了までに時間を要するだけでなく、蒸気養生の開始が遅れることにより所定のプレストレス導入時刻に必要な強度が得られない場合は、生産性を大きく低下させる。これまでに筆者らは ACX を用いて凝結および初期強度を促進させることで、これらを解決する方法を提案した<sup>3)</sup>。その際に、蒸気養生による製造において ACX をセメント質量の 1.5% 添加することで品質を損なうことなく、無添加と比較して、材齢 18 時間における圧縮強度が 1.18 倍になることを確認している。それを踏まえると ACX 添加率をさらに大きくして圧縮強度が増加すれば、蒸気養生に替わって所定の強度を満足する可能性がある。そこで、表-2 のスランプフロー 45cm のコンクリートを対象に、蒸気養生を行わない場合の圧縮強度と ACX 添加率を検討し、コンクリートの品質および構造性能への影響の有無を確認した。なお、コンクリートの初期強度は、同じ材齢時において小さな部材や冬期の製造では圧縮強度を得にくい。そのため、JIS A 5373 に規定されるプレテンション方式 PC 桁のうち、スラブ桁の最も桁高が小さい AS05 (桁高 350mm、桁長 5.3m) を実験の対象とした。

#### 4.2 硬化促進剤の添加率と圧縮強度

##### (1) 圧縮強度と積算温度の関係

室内試験において、ACX を 0, 2, 4 および 6% 使用したコンクリートを練り混ぜ、円柱供試体を採取して、材齢 16, 18 および 20 時間における圧縮強度を測定した。円柱供試体の養生は恒湿恒温装置を用いて温度解析で想

定された AS05 の温度履歴を与えた。図-1 に ACX 添加率毎の積算温度と圧縮強度の関係を示す。いずれにおいても各材齢時の積算温度と圧縮強度は高い相関を示し、ACX の添加率が大きいほど同等の積算温度であっても圧縮強度が大きくなることを確認した。

(2) 温度履歴および外気温と積算温度の関係

ACX 添加率および外気温による AS05 の積算温度を把握するため、外気温 5, 15 および 25°C, ACX 添加率 0, 2 および 4% の組合せによる 9 ケースの温度履歴を実物

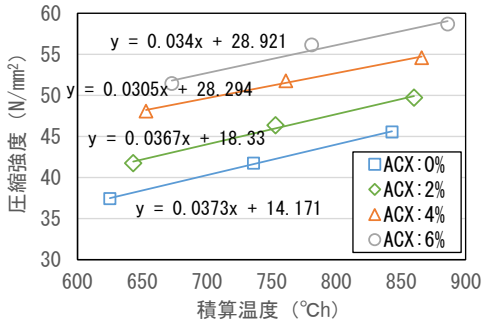


図-1 積算温度と圧縮強度の関係

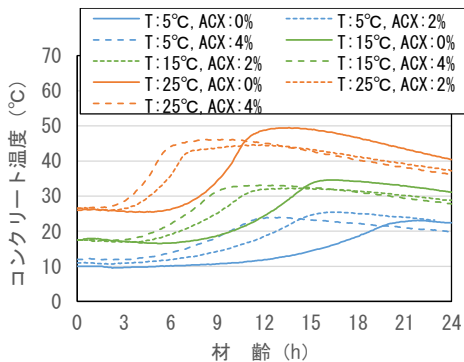


図-2 コンクリートの温度履歴

表-3 材齢 16 時間の積算温度

ACX 添加率 (%)	材齢 16 時間の積算温度 (°Ch)		
	外気 5°C	外気 15°C	外気 25°C
0	338	500	728
2	404	546	762
4	440	579	796

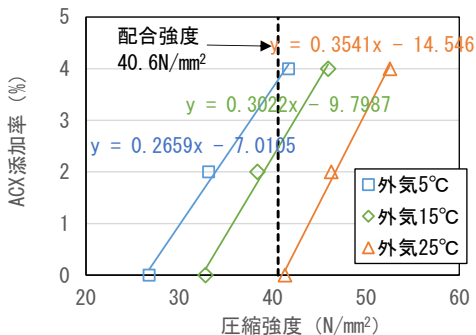


図-3 ACX 添加率と圧縮強度の関係

サイズの試験体で測定した。試験体は断面形状を AS05 と同じにした長さ 500mm とし、型枠は実際に使用している鋼製の側枠を使用し、小口型枠を厚さ 200mm の発泡スチロールとした。なお、試験は室内で行い、打込みから養生中の雰囲気温度はそれぞれのケースで一定とした。図-2 に試験体側面 (表面) の温度履歴を示す。ACX 添加率が大きいほど水和発熱による温度の立ち上がりは早くなる傾向がみられた。これによって特に初期材齢において積算温度が飛躍的に増加し、強度発現が早くなるものと考えられる。

(3) 硬化促進剤の添加率と圧縮強度の関係

表-3 は図-2 における材齢 16 時間の積算温度を算出したものである。図-3 はこれを図-1 の関係式に代入して ACX 添加率と圧縮強度の関係を示したものである。変動係数 8% とした場合、プレストレス導入時の必要強度 35N/mm² に対し、配合強度は 40.6N/mm² となるが、本実験の範囲においては、図-3 の関係式から配合強度を満足するために必要な ACX 添加率は、外気温 5°C の場合が 3.8% 以上、外気温 15°C の場合が 2.5% 以上、外気温 25°C の場合が 0.1% 以上と設定することができる。このように、外気温に応じた ACX 添加率を定量的に設定することで、経済的な製造管理が可能となると考えられる。

4.3 プレテンション方式橋桁の試験製造

(1) 製造

これまでの検討結果を検証するため、最も気温の低い 2 月に実部材の AS05 を製造した。外気温が平均 5°C 以下と予想されたことから、図-3 より、製造は ACX を 5% 添加して蒸気養生を行わない方法と従来の蒸気養生 (前置き 5 時間、温度勾配 15°C/h, 最高温度 45°C) による方法の 2 ケースとした。図-4 に温度履歴を示す。ACX による製造では外気温が 0~10°C 程度にも関わらず、打込み完了から早いうちに水和発熱による温度上昇が見られた。図-5 に圧縮強度の結果を示す。圧縮強度用円柱供試体は AS05 の部材側面温度による温度追従養生とした。ACX による製造では、材齢 16 時間でプレストレス導入時強度 35N/mm² を十分に満足し、材齢 7 日の時点では設計基準強度 50N/mm² を満足した。また、蒸気養生による

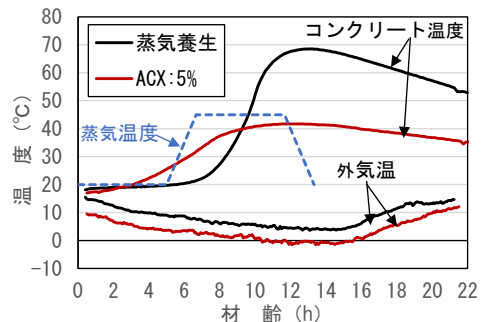


図-4 温度履歴の比較

製造と比較すると、材齢 16 時間の圧縮強度は低いものの、材齢 7 日以降では高くなっている。これは高温履歴が抑制されたことが以降の圧縮強度の増進に寄与したものと推察され、コンクリートの緻密化など耐久性に有利であることを示唆するものと考えられる。なお、材齢 16 時間での圧縮強度  $47.8\text{N/mm}^2$  は配合強度よりも 17% 大きい。図-2 で示したように、実部材では ACX を添加することにより、水和発熱の立ち上がりが早くなることが、図-1 に示した室内試験での関係と異なる点である。工程管理の上ではプレストレス導入時に所定の圧縮強度以上が得られれば良いが、配合強度により近いほうが経済的であることから、その最適化の検討が必要であると考えられた。

### (2) 荷重試験

ACX により製造した部材の構造性能を確認するため、材齢 28 日時に JIS A 5373 に準じた曲げ荷重試験を行った。写真-3 に試験状況を示す。支間長は 5m とし、加力の荷重スパンは 1m とした。荷重は曲げひび割れの発生を確認して一旦除荷し、その後、破壊に至るまで漸増荷重した。図-6 に荷重と変位の関係を示す。JIS A 5373 に示される設計曲げひび割れ耐力に相当する荷重 129kN ではひび割れは認められず、160kN で支間中央付近の下面にひび割れが発生した。その後、設計曲げ破壊耐力に相当する荷重 293kN で破壊せず、最大荷重 339kN で破壊に至った。このことから、ACX で製造した部材は JIS A 5373 において要求される性能を満足し、十分な構造性能を有していることを確認した。

### (3) 耐久性に関わる一考察

製造した 2 ケースの AS05 の底面からコンクリート片を採取し、水銀圧入ポロシメータを用いて細孔径分布を測定した(図-7)。なお、ACX で製造した部材は荷重後に荷重点から離れた位置でコンクリート片を採取した。製造方法による明確な違いは見られず、ACX による製造は従来の製造方法と同等の耐久性能を有していることを示唆した。

## 5. 実部材の製造

### 5.1 概要

以上の検討を踏まえ、実部材に ACX を添加した締固めを必要とする高流動コンクリートを適用した製造を行った。対象とした部材は JIS A 5373 におけるスラブ桁 BS14 の形状(桁高 550mm, 桁長約 14m)で、従来であれば蒸気養生を行わないと所定の材齢で要求される圧縮強度を満足しない時期である 11 月下旬から 12 月中旬にかけて 1 日 2 本ずつ 23 本製作した。製造工場は前述の検討と異なるが、既の実績のあるスランプフロー 45cm の締固めを必要とする高流動コンクリートをベースとして

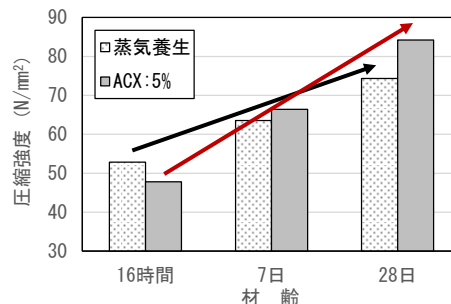


図-5 圧縮強度の比較



写真-3 荷重試験の状況

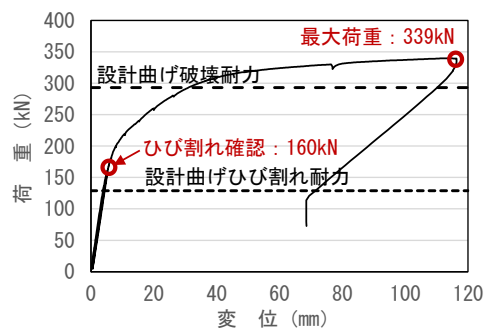


図-6 荷重と変位の関係

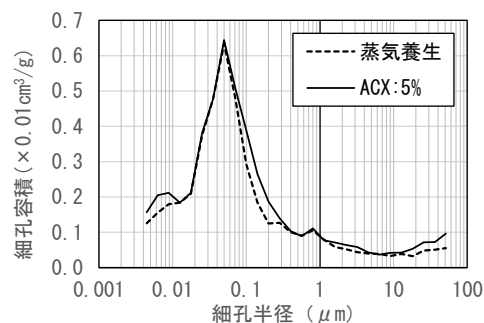


図-7 細孔径分布の比較

配合設計した。製作日数 12 日(回)の製造において、コンクリート温度および外気温を測定し、圧縮強度や ACX 添加率等との関係を整理した。

### 5.2 コンクリートの使用材料および配合

表-4 に使用材料を、表-5 に配合を示す。スランプフローは  $45 \pm 7.5\text{cm}$ 、空気量は  $4.5 \pm 1.5\%$  である。なお、表-6 に示すように、土木学会「締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針(案)」<sup>4)</sup>に記載される JSCE-F 701 付属書 1 に準じた間隙通過速度および JSCE-F 702 に準じた粗骨材量比率を測定し、流動性および材料分離抵抗性は満足することを事前の試し練りで

表-4 使用材料

練混ぜ水(W)	上水道水
セメント(C)	早強ポルトランドセメント (比重3.14)
細骨材(S)	石灰砕砂 (比重2.68, 粗粒率2.68, 実積率58.1%)
粗骨材(G)	石灰砕石 (比重2.70, 粗粒率6.50, 実積率61.7%)

表-5 コンクリートの配合

SLF	W/C	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
cm	%	%				
45	35.4	47.5	155	438	841	936

表-6 締固めを必要とする高流動コンクリートの品質

測定項目		試験値	管理値
スランプフロー	cm	43.0	45±7.5
空気量	%	4.2	4.5±1.5
間隙通過速度	mm/s	35.6	15以上
粗骨材量比率	%	81.4	40以上

確認している。ACX 添加率は、製造工場の地域の過去3年間の平均外気温が約9℃、最低気温が約5℃であり、使用コンクリートは異なるものの、配合条件が近いいため、図-3の目安(外気温5℃時で3.8%以上)を参考として、4.0%添加で計画した。その上で圧縮強度試験の結果を踏まえて添加率を修正していくこととした。

### 5.3 フレッシュ試験と圧縮強度の結果

表-7にスランプフロー、空気量、プレストレス導入時および材齢7日の圧縮強度の結果およびプレストレス導入時の材齢を示す。なお、製造5回目および9回目は休日を挟んでの製造のため、材齢3日にプレストレスを導入することから、ACXは添加していない。また、後述するが、製造7回目以降のACX添加率を3.5%に修正している。いずれの製造もスランプフローおよび空気量は管理値を満足し、ACXを添加しない場合を除き、従来の蒸気養生による製造と同等の材齢15~17時間程度でプレストレス導入に必要な圧縮強度35N/mm<sup>2</sup>を十分に満足した。また、品質を保証する材齢7日(出荷時)において設計基準強度50N/mm<sup>2</sup>を満足し、ACX添加の有無に関わらず12回における標準偏差2.94N/mm<sup>2</sup>、変動係数4.7%であった。このことから、ACXを添加による圧縮強度のばらつきは標準的な範囲以下であり、品質の安定した部材が製造できることを確認した。

### 5.4 圧縮強度と積算温度、硬化促進剤の添加率の関係

プレストレス導入時の圧縮強度は外気温や材齢によって異なるため、合理的に管理するためにはその関係を明確にする必要がある。図-8に圧縮強度と積算温度の関係を示す。最初の5回の製造で圧縮強度の下限が配合強

表-7 フレッシュ試験と圧縮強度

製造(回)	ACX (%)	SLF (cm)	Air (%)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		プレ導入時の材齢(h)
				プレ導入時	材齢7日時	
1	4	44.0	3.9	51.1	63.0	16.9
2	4	47.0	4.0	41.6	66.7	15.0
3	4	46.0	3.7	43.2	63.2	15.0
4	4	44.5	3.7	45.6	60.7	15.5
5	0	42.0	4.0	51.9	59.2	※3日
6	4	48.0	3.9	44.0	61.7	16.5
7	3.5	45.0	3.9	46.3	62.3	15.3
8	3.5	49.0	4.2	47.6	65.0	16.0
9	0	42.5	3.5	53.9	54.9	※3日
10	3.5	48.0	3.9	49.6	63.8	15.7
11	3.5	45.0	3.8	49.2	62.1	14.7
12	3.5	46.0	4.0	52.2	61.0	18.3

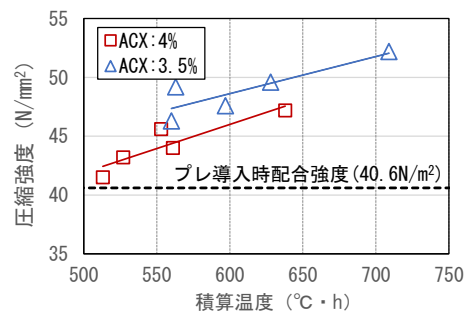


図-8 圧縮強度と積算温度の関係

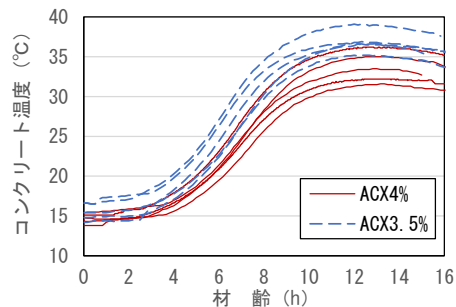


図-9 コンクリート温度の履歴

度以上であったことから、製造7回目以降からACX添加率は3.5%とした。しかし、積算温度が同等な場合でもACX添加率4.0%より3.5%の圧縮強度は3N/mm<sup>2</sup>程度大きい。この理由について、図-9に示すように、傾向的に打込み温度が高く、温度上昇が早まり、最高温度も高くなっていることが挙げられる。積算温度法にはこれらも加味されているが、水和発熱をともなう実部材では初期温度が高いほどACXが加速的に活性化される可能性が推察される。本稿では明確な考察を得られなかったが、今後、ACX添加率の最適化を目指し、データの蓄積により明らかにしていく必要があると考えている。

### 5.5 実部材における低炭素化と生産性向上の効果

写真-4にスランプフローの一例と製造した実部材を示す。前述のとおり、蒸気養生を行わずに所定の材齢に必要な強度が得られたことで低炭素化への効果を確認した。加えて、締固めに時間を要さないことで打込みが連

続的に行え、充填完了までの時間が短縮され、さらに、温度上昇が早まることにともなって凝結時間が短縮されたことから仕上げ完了までの時間が短縮されたことで生産性向上への効果を確認した。また、通常の管理の範囲において課題となる点は見られなかった。



写真-4 スランプフローと製造した実部材

## 6. 製造管理の定量的方法の一考察

製造管理の合理化や材料使用量の最適化を図るには、製造毎の環境条件に対して適切な ACX の添加率とすることが望ましい。外気温に応じたコンクリート温度の履歴が把握できれば、積算温度との関係から圧縮強度が推定できる。そこで、コンクリート温度の履歴と並行して実測した外気温を用いた解析から求めた。図-10に ACX を添加しない場合 (0%)、4.0%および3.5%添加した解析値と実測のコンクリート温度および外気温の一例を示す。紙面の都合上、詳細は割愛するが、ACX の添加による圧縮強度の増加が水セメント比を小さくすることに相当すると仮定して ACX 添加率 4.0%の場合を水セメント比 29.5%と仮定し、単位セメント量  $537\text{kg/m}^3$  を解析条件とした。また、ACX 添加率 3.5%については直線補間により仮定した。解析の結果、製造5回目における ACX 添加率 0%では一般に用いられる解析条件で解析値と実測値はほぼ一致した。ただし、温度上昇の開始点は早強ポルトランドセメントの場合は一般に0.2日とされるが、実測値に合わせて0.3日とした。これは一般の温度解析で対象とされる部材より寸法が小さいことから、外気温の影響により温度上昇の開始点が遅れるものと推察される。ACX を添加した場合は、単位セメント量と温度上昇の開始点以外を ACX 添加0%場合と同じ条件とすることで、解析値と実測値はほぼ一致し、解析によって再現あるいは事前に予測することができる可能性を示唆した。蒸気養生は外的に温度上昇を促進することから温度履歴の予測が難しく、定量化するには高度な管理が必要であるが、ACX による製造がこのように一定の関係であることが確認できれば、より製造管理の合理化が期待できる。

## 7. まとめ

プレキャストコンクリート製品を対象に、硬化促進剤を添加した締固めを必要とする高流動コンクリートを用いて、低炭素化と生産性向上へ寄与する製造方法を検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) A 重油を燃焼する蒸気養生を行わずに所定の材齢に必要な強度が得られ、低炭素化の効果があることを確認した。また、打込み時間や仕上げ時間の短縮、棒状パイプレータによる締固め作業の低減ができ、生産性向上の効果があることを確認した。

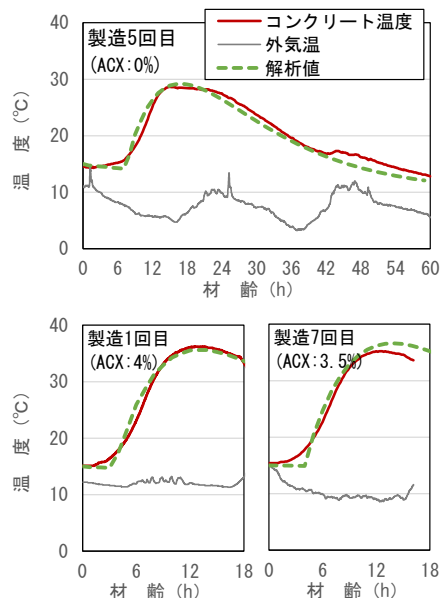


図-10 温度解析による再現

- (2) JIS A 5373 に規定されるプレテンション方式 PC 桁への適用に対し、所定の曲げひび割れ耐力および曲げ破壊耐力を有することを載荷試験で確認した。
- (3) 実部材へ適用した結果、品質の安定した部材が製造でき、従来と同等以上の製造および管理ができることを確認した。
- (4) 最適な製造管理を目的とした定量的管理に関する今後の課題を示した。

## 参考文献

- 1) (社)土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針，2012.6
- 2) 中村敏之，北澤利春，佐々木良太，呉 承寧：蒸気養生で製造されるコンクリートの表層品質，プレストレストコンクリート工学会第 23 回シンポジウム論文集，pp.77-80，2014.10
- 3) 中村敏之，北澤利春，並木昌幸，呉 承寧：蒸気養生で製造するコンクリートの品質向上に関する早強剤の効果，プレストレストコンクリート工学会第 24 回シンポジウム論文集，pp.621-626，2015.10
- 4) (社)土木学会：締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針 (案)，2023.2