

# 報告 超低発熱セメントを用いた実構造物での温度応力計測

中原健司\*1・藤江耕二\*2・高橋 攻\*3・壹岐直之\*4

**要旨：**橋脚下部工の施工時に温度ひびわれ発生が予測された。制御対策として超低発熱セメントを使用し、制御対策の効果を確認するため温度応力計測を行った。計測の結果、最高温度は52.3℃、最大引張応力は1.37N/mm<sup>2</sup>、最小ひびわれ指数は0.83であった。材齢初期において表面にひびわれが発生したが、幅は0.03mmであり、構造物に悪影響を及ぼすものではなかった。超低発熱セメントを使用することにより、当初計画では0.49と予測されたひびわれ指数を0.83へ向上させ、抑制効果があったことを確認した。

**キーワード：** マスコンクリート、温度ひびわれ、超低発熱セメント、現場計測

## 1. まえがき

近年、コンクリート構造物の早期劣化が社会的な問題となり、施工中の初期欠陥が構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすことが再認識されている。温度ひびわれも、塩分浸透を速める等、耐久性に悪影響を及ぼす初期欠陥となるため、その発生を極力抑制する必要があることは周知のことである。

本構造物は海洋上に建設される橋脚である。このため、温度ひびわれの発生を極力抑制する必要があった。また、図-1に示すように、長さ7.0m、幅3.4mの断面を有し、高さは18.1m、1回の打設高さが3~4mである。このため、マッシュなコンクリートに該当し、コンクリート内部は高温になると推測された。さらに、鋼管矢板井筒基礎上に建設されるため、特に橋脚の下部では外部拘束が強くなり、温度応力が大きくなると推測された。

これらのことから本構造物では、温度ひびわれ制御対策として超低発熱セメントを用いることとし、その効果を確認するため温度・ひずみ・応力の計測を行った。本報告は、計測の結果を取り纏め、事前解析との比較と、対策効果の評価を行ったものである。

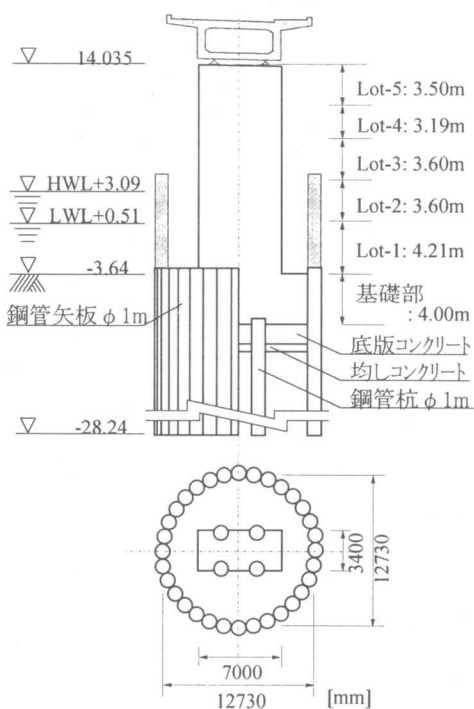


図-1 構造物の概略図

## 2. 温度ひびわれ制御対策方法

当初、セメントは、普通ポルトランド57~58%、高炉スラグ42~43%の成分からなる高炉B種を使用する予定であった。コンクリート配合を表-1に示す。事前解析の結果、最高温度は72.1℃、

\*1山口県 周南港湾管理事務所 主任技師 (正会員)  
 \*2山口県 周南港湾管理事務所 主任 (正会員)  
 \*3若築建設(株)・澤田建設(株) 共同企業体 新南陽大橋工事事務所長  
 \*4若築建設(株) 土木本部 技術研究所 (正会員)

表-1 当初予定コンクリート配合 (24-8-20 BB)

水セメント比[%]	細骨材率[%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
54	42.5	308	166	769	1084	3.33

表-2 対策後のコンクリート配合 (24-8-20 SLG)

水セメント比[%]	細骨材率[%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
55	43.0	291	160	779	1076	3.14

表-3 事前解析に用いた諸定数 および 結果

		高炉B種	超低発熱
打設時期		6月	
打設時のコンクリート温度 [°C]		20.3	
断熱温度上昇式の定数	$Q_{\infty}$ [°C]	50.8	23.6
	$\gamma$	0.88	0.85
密度	[kg/m <sup>3</sup> ]	$2.30 \times 10^3$	
比熱	[J/(g°C)]	1.25	
熱伝導率	[W/(m°C)]	2.4	
熱伝達係数 [W/(m <sup>2</sup> °C)]	天端	14	
	型枠	14	
熱膨張係数	[1/°C]	$10 \times 10^{-6}$	
圧縮強度推定式 (1)	$f'_c(91)$	44.0	34.3
	$a$	8.62	13.9
	$b$	0.93	0.83
引張強度推定式 (2)	$c$	0.35	
有効弾性係数推定式(3)	$t < 3$	0.73	
	$t > 5$	1.0	
解析結果	最高温度 [°C]	72.1	44.4
	最小ひびわれ指数	0.49	1.05

最小ひびわれ指数は0.49と予測し、比較的大きな幅のひびわれが発生すると予測された。

ひびわれ制御対策は、温度応力解析による制御対策効果の予測結果と、経済性・施工性を考慮して決定し、3成分系の超低発熱セメントを用いることとした。成分比率は普通ポルトランド23%、高炉スラグ50%、フライアッシュ27%である。コンクリートの配合を表-2に示す。事前解析の結果、最高温度は44.4°C、最小ひびわれ指数は1.05と予測された。

それぞれの解析に用いた諸定数および結果は表-3に示した。解析は非定常熱伝導を考慮した3次元有限要素法により行い、圧縮強度、引張強度および有効弾性係数はコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>(以下で、標準示方書と称す)の推定式(1)、(2)、および(3)を用いた。

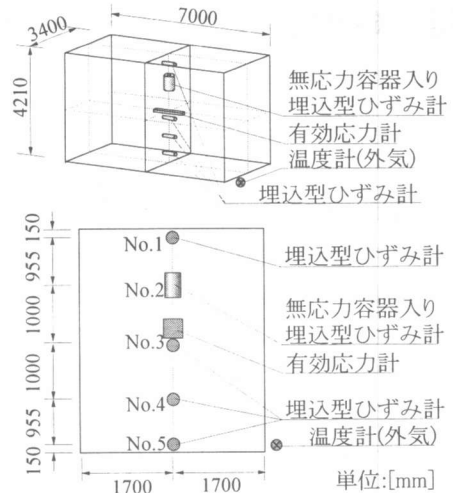


図-2 計測項目および配置

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+b \cdot t} \cdot f'_c(91) \quad (1)$$

$$f_t(t) = c \cdot \sqrt{f'_c(t)} \quad (2)$$

$$E_e(t) = \Phi(t) \cdot 4700 \cdot \sqrt{f'_c(t)} \quad (3)$$

ここに、 $f'_c(t)$  : 材齢  $t$  日の圧縮強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$f_t(t)$  : 材齢  $t$  日の引張強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$E_e(t)$  : 有効弾性係数 [N/mm<sup>2</sup>]

$a, b, c$  : 定数 ( $a, b$  は表-3,  $c = 0.35$ )

$\Phi(t)$  : 補正係数 ( $t < 3: 0.73, t > 5: 1.0$ )

### 3. 温度応力計測

#### 3.1 計測項目および配置

計測機器は図-2に示すように、鋼管矢板基礎の直上となる第1ロットの、中心鉛直線上に配置した。温度および全ひずみは、測温機能付き埋込型ひずみ計(東京測器:KM-100BT)を用いて測定した。コンクリートの自由ひずみは、無応力容器(同:KMF-51)に入れた埋込型ひずみ計により計測した。有効応力は、中央部のひずみ計の直上に有効応力計(東横エルス:GK-100-505)を設置して計測した。自由ひずみの計測は鉛直方向とし、これ以外の計測器は橋脚の長手方向とした。

以下に示す計測結果において、材齢、ひずみ、および応力の初期値は、コンクリートの安定に伴う計測データの安定、および有効応力の発生から判断して、打設終了から12時間後とした。

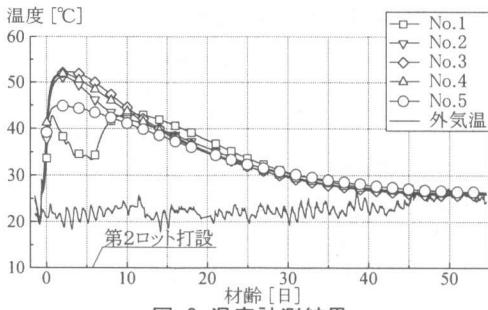


図-3 温度計測結果

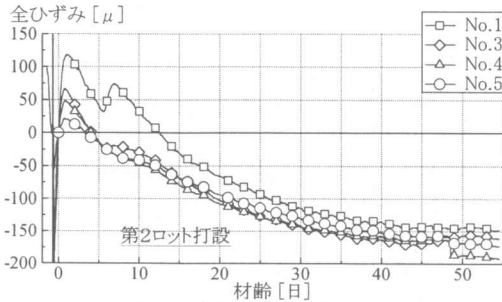


図-4 全ひずみ計測結果

セメントメーカー技術資料による凝結時間は、始発が10時間、終結が18時間である。

なお、本構造物でのコンクリートの打設は1999年4月～8月に行われ、計測を行った第1ロットは6月初旬に打設された。計測期間は止水矢板撤去までの54日間とした。

### 3.2 温度計測結果

各計測点での温度の経時変化を図-3に示す。現場到着時のコンクリート温度は26℃であった。最高温度は、材齢3日にNo.3（中心部）で52.3℃となった。セメントメカ技術資料で、セメント量300kg/m<sup>3</sup>、成形温度26℃として算定した断熱温度上昇量は22.6℃であった。計測された最高温度は、打設温度26℃と、この断熱温度上昇量との和の48.6℃より、若干大きな値となった。

材齢3日程度以降は温度が低下し、材齢45日程度で、コンクリート内部の温度はほぼ外気温と等しくなった。材齢6日程度でNo.1（最上部）の温度が上昇したのは、第2ロット打設の影響である。第2ロットの水和熱により、No.1の温度が9℃程度上昇したが、これ以外の計測点へは影響は及ばなかった。

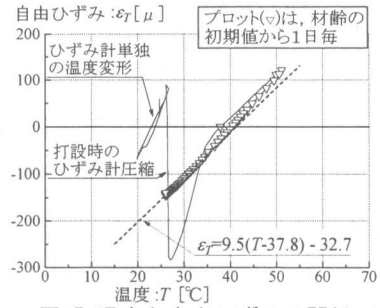


図-5 温度と自由ひずみの関係

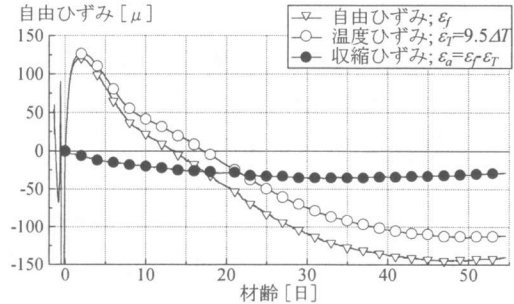


図-6 自由ひずみ計測結果

### 3.3 ひずみ計測結果

各計測点の全ひずみの経時変化を図-4に示す。ひずみは正の値が膨張である。全ひずみは材齢1日程度までは膨張し、これ以降は収縮に転じた。材齢6日程度でNo.1（最上部）のひずみが膨張したのは、第2ロット打設による温度上昇の影響である。また、材齢48日程度において、No.4で27μ、No.5（最下部）で10μほど、ひずみが一時的に減少した。これは、第1ロットの下側内部に局所的なひびわれが生じたためと考える。なお、現場での観測では、このとき表面にはひびわれが発生していなかった。

No.2で、無応力容器に入れて計測した自由ひずみと、温度との関係を図-5に示す。温度とひずみの関係がほぼ直線とみなせる材齢20日以降で近似した結果、熱膨張率は $\alpha_T = 9.5 \mu/\text{℃}$ となった。近似した熱膨張率から算定されるひずみを温度ひずみとし、実測した自由ひずみとの差を収縮ひずみとして、経時変化を図-6に示す。この収縮ひずみは、温度上昇時と下降時での熱膨張係数の違いや、乾燥収縮および自己収縮等を含んでいるが、現時点では分類することが困難

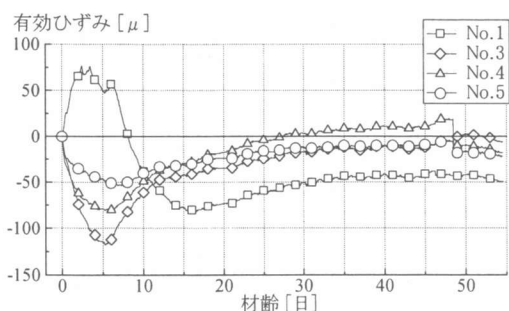


図-7 有効ひずみ算定結果

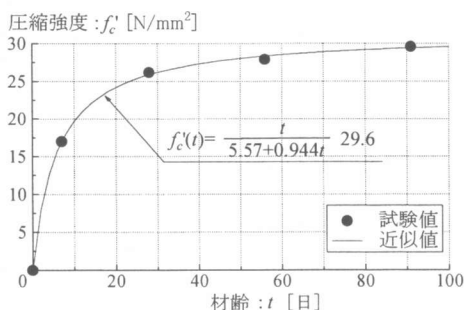


図-8 圧縮強度の試験結果

であるため、一括して扱う。この収縮ひずみは材齢30日程度まで増加し、32μ程度となった。

### 3.4 有効ひずみ算定結果

各計測点での有効ひずみは、熱膨張係数および収縮ひずみは位置にかかわらず一定と仮定し、各計測点の全ひずみから、 $\alpha_T=9.5\mu/\text{C}$ として各計測点の温度から算定した温度ひずみと、収縮ひずみを、差し引いた値とした。

各計測点での有効ひずみの算定値を図-7に示す。No.1(最上部)の有効ひずみは、材齢8日までは引張側にあり、材齢2.5日に最大81.9μとなった。No.3(中央部)より下側の有効ひずみは、材齢5~7日までは圧縮側に増加し、これ以降は引張側に増加する傾向を示した。材齢27日にNo.4で引張ひずみが生じた。

### 3.5 圧縮強度 および 有効弾性係数

標準養生を行ったφ10×20cm供試体の圧縮強度試験結果と、圧縮強度の推定式(1)による計算値を図-8に示す。式(1)中の91日圧縮強度は強度試験結果の29.6N/mm<sup>2</sup>とし、定数 $a, b$ は強度試験結果から近似した。

有効弾性係数の実測値と、有効弾性係数の推

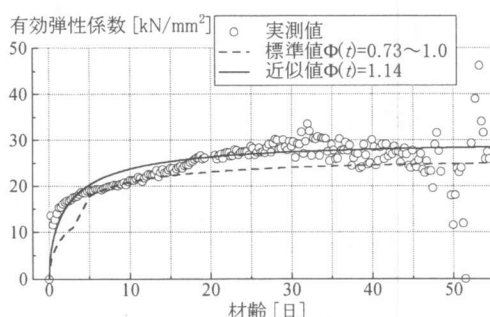


図-9 有効弾性係数の計測結果

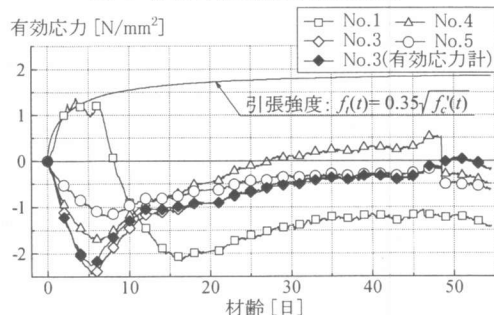


図-10 有効応力の算定結果

定式(3)による計算値を図-9に示す。有効弾性係数の実測値は、各材齢での有効応力計による計測値と、No.3の有効ひずみとの比とした。式(3)中の補正係数を標準示方書に従い、材齢3日までを $\Phi(t)=0.73$ 、材齢5日以降を $\Phi(t)=1.00$ として算定した場合、実測値とは一致しなかった。 $\Phi(t)$ を、材齢による変化はないとし、バラツキの少ない材齢0~25日の実測値を用いて近似した結果、 $\Phi(t)=1.14$ であった。

### 3.6 有効応力の算定結果

各計測点での有効応力と、有効応力計での実測値を図-10に示す。各計測点での有効応力は、3.4で算定した有効ひずみに、式(3)で $\Phi(t)=1.14$ として算定した有効弾性係数を乗じて求めた。図-10には、No.3の位置で計測した有効応力と、引張強度の推定式(2)で算定した値も示した。

No.1(最上部)の有効応力は、材齢2~6日に引張強度とほぼ同程度となり、材齢3.5日に最大1.37N/mm<sup>2</sup>となった。材齢8日で応力は圧縮側に反転した。材齢16日まで圧縮応力が増加し、これ以降は減少する傾向を示した。No.3(中央部)より下側の有効応力については、材齢5~7日ま

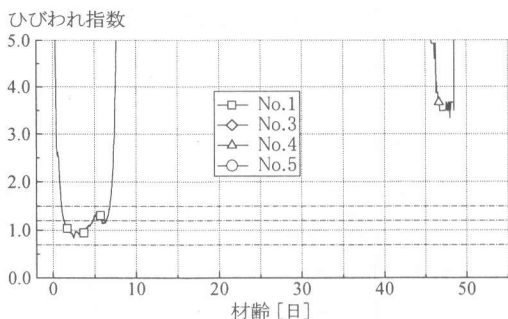


図-11 ひびわれ指数の算定結果

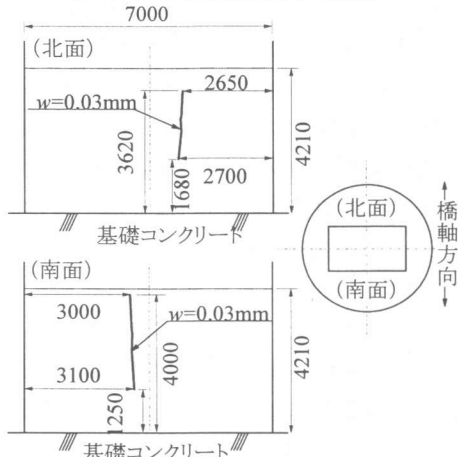


図-12 ひびわれ発生状況 (材齢15日)

では圧縮側に増加し、これ以降は引張側に増加する傾向を示した。材齢27日にNo.4で引張応力が生じた。

有効応力の経時変化の傾向は、有効ひずみと同様に、材齢初期の内部拘束と、長期にわたる外部拘束との複合作用による温度応力の一般的な傾向を示した。

### 3.7 ひびわれ指数の算定結果

ひびわれ指数の経時変化を図-11に示す。No.1 (最上部) およびNo.4以外のひずみ計測点でのひびわれ指数は5以上であったため、図-11にはプロットされていない。

No.1のひびわれ指数は、材齢1日から6.5日までの間は1.2以下となり、材齢3.5日で最小値の0.86となった。これは、躯体の表面付近ではひびわれの発生する可能性が高い状態となったことを示し、実際に、躯体長手側面の中央に、幅0.03mmの鉛直ひびわれが1本発生したことと一

表-4 事前解析結果 および 計測結果

条件	打設時期	高炉B		超低発熱	
		事前解析		実測	
	コンクリート打設温度 [°C]	6月		6月	
		20.3		26.0	
初期	材齢 [日]	5.0	5.0	2.5	
	外気温 [°C]	22.2	22.2	23.0	
	躯体最高温度 [°C]	72.1	44.4	52.3	
	最小ひびわれ指数	0.54	1.20	0.83	
長期	材齢 [日]	90.0	90.0	48.0	
	外気温 [°C]	23.4	23.4	24.5	
	躯体最高温度 [°C]	25.7	25.5	25.0	
	最小ひびわれ指数	0.49	1.05	3.34	

致した。図-12にひびわれ発生状況を示す。なお、計測位置は上面であり、ひびわれ発生は側面であるが、第2ロットの打設までは両位置ともに外気に接する面であるため、温度・応力はほぼ同じ状態となる。

長期材齢でのひびわれ指数は1.5以上であり、構造物に悪影響を及ぼすひびわれは発生しなかったことを確認した。

## 4. 考察

### 4.1 事前解析と計測結果の比較

表-4に、超低発熱セメントについて行った事前解析の結果、および実測に基づく最高温度・最大引張応力・最小ひびわれ指数を示す。表-4には、高炉セメントについて行った事前解析の結果も併せて示した。なお、温度ひびわれのメカニズムは、材齢初期での内部拘束に起因する表面ひびわれと、長期材齢での外部拘束に起因する貫通ひびわれとは異なる。このため、表-4ではこれらを分けて示した。

最高温度について事前解析と実測値とでは、7.9°Cの差があった。これは、事前解析と実測とでは打設温度が5.7°C異なり、最高温度を記録したときの外気温に1°C程度の差があったためであろう。このとき、内部と外部との温度差は、事前解析では22.2°C、実測では29.3°Cであった。このため、材齢初期の最小ひびわれ指数は、内部と外部の温度差が7.1°C少ない事前解析のほうが、0.37ほど大きな値となった。

長期材齢での最小ひびわれには2.29の差があった。長期的な温度応力は外部拘束に起因するものであり、内部の最高温度と定常状態となったときの温度との差が支配的要因となる。この温度差は、事前解析では18.9℃、実測では27.3℃であった。本来、最小ひびわれ指数は温度差が小さな事前解析のほうが大きくなるはずであるが、逆の結果となった。この理由について現時点では不明確であるが、基礎部のコンクリートの温度変形も影響したと考えている。

#### 4.2 制御対策の効果

当初予定であった高炉セメントの解析結果では、最高温度は72.1℃、最小ひびわれ指数は材齢初期の表面ひびわれについて0.54、貫通ひびわれについて0.49であった。実際に高炉セメントを用いた場合、実測では事前解析よりも打設時のコンクリート温度および外気温が高かったため、事前解析よりも最高温度は高く、ひびわれ指数は小さくなっていただろう。

超低発熱セメントを用いた場合、実測値より、最高温度は52.3℃、最小ひびわれ指数は材齢初期の表面ひびわれについて0.83、貫通ひびわれについて3.34となった。また、ひびわれは図-12に示した幅0.03mmのもの以外には発生しなかった。これらのことから、超低発熱セメントを使用することによって、温度ひびわれを抑制できたと考えられる。

#### 4.3 ひびわれ指数と幅の関係

標準示方書<sup>1)</sup>では、ひびわれ指数の参考値として、“ひびわれ幅が過大とならないよう制限したい場合”は0.7を設定している。

一方、本構造物では、表面の最小ひびわれ指数は計測結果から0.83と算定され、幅0.03mmのひびわれが発生した。このひびわれは、本構造物のかぶり7cmから算定される許容幅<sup>2)</sup>0.24mm(=0.0035×70mm)以下であり、過大な幅とならなかった。これらのことは、標準示方書のひびわれ指数の参考値を裏付ける結果となった。なお、このひびわれは内部拘束に起因し、ひびわれ周辺の応力は経時に伴い圧縮側に反転する。

このため、このひびわれは進展するものではないと考えている。

#### 5. まとめ

超低発熱セメントを用いたマッシュな構造物で、温度応力の現場計測を行った。事前解析および計測の結果から以下に示す結論を得た。

- ① 内部の最高温度は、当初予定のセメントでは72.1℃と推測されたが、超低発熱セメントを用いることにより52.3℃へ低減できた。
- ② 実測による熱膨張係数は9.5 $\mu$ /℃と算定され、標準的な値とほぼ同じであった。
- ③ 標準示方書の有効弾性係数推定式の補正係数を実測値から近似した。標準値は0.73～1.0であるが、近似値は1.14となった。
- ④ 実測による最小ひびわれ指数は材齢2.5日に0.83となった。このとき、幅0.03mmのひびわれが発生したが、過大とはならなかった。
- ⑤ 最小ひびわれ指数は、当初予定のセメントでは0.49と推測されたが、超低発熱セメントを用いることにより0.83へ向上できた。
- ⑥ 本構造物には、本文中で示したものの以外に、ひびわれは発生しておらず、超低発熱セメントは温度ひびわれ制御に有効であった。

今後、本構造物と同じセメントを用いた橋脚を2000年2月に打設し、この橋脚についても温度応力の計測を行う。本報告での計測は夏季であったが、この計測は冬季のものとなる。このため、異なる外気温での情報を得ることができ、コンクリートの物性等を高い精度で分析できると考えている。この計測結果については、後日報告する予定である。

#### 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 [平成8年制定] 施工編, 土木学会, 1996. 3, pp. 173～193
- 2) コンクリート標準示方書 [平成8年制定] 設計編, 土木学会, 1996. 3, pp. 87～88
- 3) マスコンクリートのひびわれ制御指針, 日本コンクリート工学協会, 1986. 3, pp. 51～82