

## コンクリート養生管理システムの開発と実適用結果に基づく効果の検証

西日本高速道路株式会社	四国支社	徳島工事事務所	岡崎 順一
西日本高速道路株式会社	四国支社	徳島工事事務所	平田 恭介
西日本高速道路株式会社	四国支社	徳島工事事務所	士野 翔勢
(株)竹中土木	技術・生産本部	技術開発部	正会員
(株)竹中土木	大阪本店	四国横断自動車道富久工事作業所	西村 直人
(株)竹中土木	大阪本店	四国横断自動車道富久工事作業所	長谷 和幸
(株)竹中土木	大阪本店	四国横断自動車道富久工事作業所	中田 孝一
(株)竹中土木	大阪本店	四国横断自動車道富久工事作業所	長野 秀二
(株)竹中土木	技術・生産本部	技術開発部	吉田 邦勝
(株)竹中土木	技術・生産本部	技術部	正会員
			市川 晃央

### 1 はじめに

近年の社会資本整備において、維持・更新の時代を迎えつつある時代の中、新設構造物においては財政逼迫等の背景からライフサイクルコスト（LCC）の最小化や長寿命化が求められる社会状況となっている。コンクリート構造物は、初期欠陥が生じると、劣化が加速度的に進行し性能低下する原因となり、これを回復させるための維持費用の増大や寿命の短縮に繋がることになる。特に初期ひび割れは構造物の安全性、水密性、耐久性を低下させ、さらに美観を損なう恐れもある。しがたって、コンクリート構造物の施工においては適切な養生対策をとり、初期ひび割れを低減させることが重要となる。

養生の基本は、図-1に示すように、湿潤に保つ 温度を制御する 有害な作用に対し保護する、である。コンクリートの養生には断熱養生、給熱養生、蒸気養生、電熱養生などがあるが、ジェットヒーター等による給熱養生の方法が多く採られている。しかし、過熱養生によるコンクリート表面の温め過ぎや給熱養生終了直後の急激な温度低下などの有害な作用により初期ひび割れ（温度応力ひび割れ）が発生する危険性がある。

今回開発したコンクリート養生管理システムの特徴は、加湿器により養生空間を湿潤状態に保つ 温度応力解析から求めた最適な養生温度になるよう自動的に給熱装置（ジェットヒーター）を起動させ、養生空間の温度を

制御する 過熱養生や急激な温度低下といった有害な作用を生じさせない、と養生の基本を満足するシステムである。

また、タブレット端末を用いた遠隔管理を導入し、どこにいてもシステムの稼働状態やコンクリート温度・養生温度等をリアルタイム監視することができる。さらに、温度応力ひび割れの発生機構に対応した適切な養生管理を行い、温度応力に起因したひび割れによる初期欠陥を抑制することが可能である。

コンクリート養生管理システムは西日本高速道路（株）の四国横断自動車道富久工事に於いて冬季のボックスカルバートの施工に実適用し、その効果を検証している。

本報では、コンクリート養生管理システムの詳細な説明と適用手順を示すとともに、実適用した結果について詳述することとする。

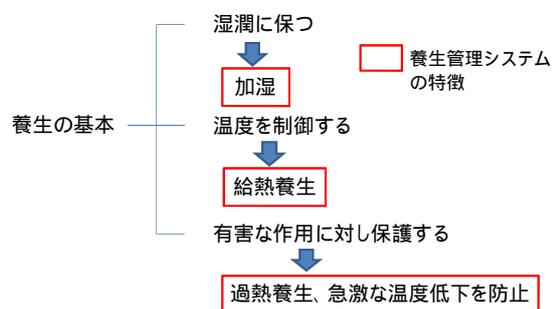


図-1 養生の基本 1)を修正

キーワード 寒中コンクリート養生，自動制御，温度応力解析，情報化施工

連絡先 〒136-8570 東京都新砂1-1-1 株式会社竹中土木 技術・生産本部 技術開発部 TEL03-6810-6215

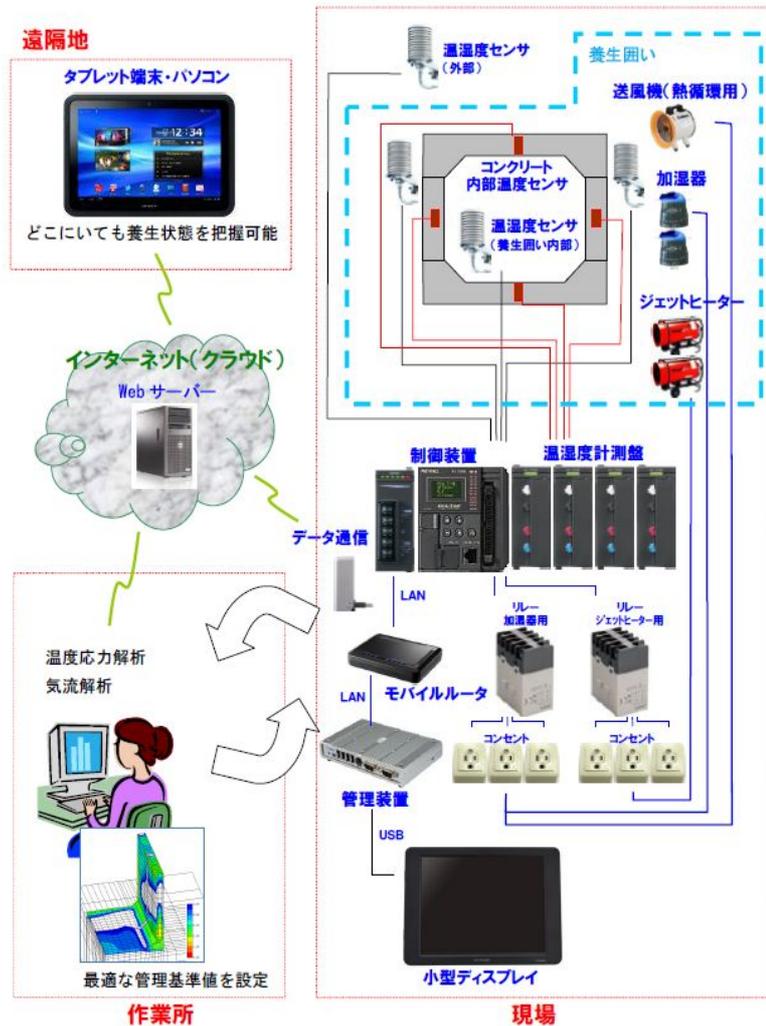


図-2 養生管理システムの構成

## 2 コンクリート養生管理システム

### (1)概要

図-2に示すコンクリート養生管理システムは、コンクリート構造物の温度及び周辺温湿度をタブレット端末を用いたリアルタイムの監視により、適時に適切な養生管理を支援するシステムである。

### (2)システムの詳細

コンクリート打設の際に生じる温度を内部及び外部に設置した温度センサにより自動計測を行い、温度応力解析結果を基に予め設定した管理基準値に連動してジェットヒーターを自動制御し、コンクリート温度を管理する。また、コンクリート内部と外部の温度差を一定範囲内に保ちながらコンクリート構造物の養生管理を行うことも可能である。なお、本システムは、養生空間を最適に熱循環させ空間内の温度を均一化する機能、養生空間内の湿度を管理基準値に連動して加湿自動制御する機能も有している。

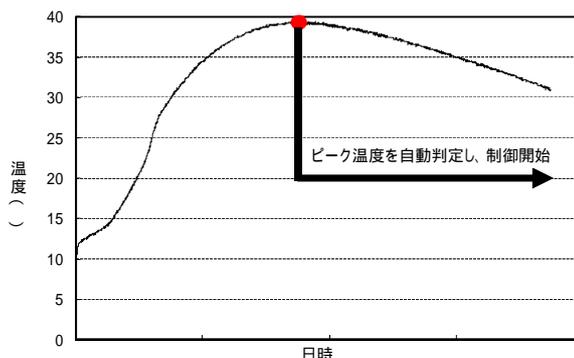


図-3 ピーク温度自動判定の例

制御はステップ毎に変わる管理基準値を自動的に適用する。初期のステップでは図-3のようにコンクリートのピーク温度を自動判定し制御を開始する機能を備えている。これは、給熱によりコンクリート発熱の最高温度を過度に上昇させることを防ぐための制御である。

必要な初期情報は予めパソコンで入力しておき、現場ではシステムに搭載された小型タッチパネルディスプレイにて制御を開始させるために必要な情報のみを選択形式で設定し、簡単に制御を開始させることができる。これらの測定データはWebで閲覧可能であり、リアルタイ

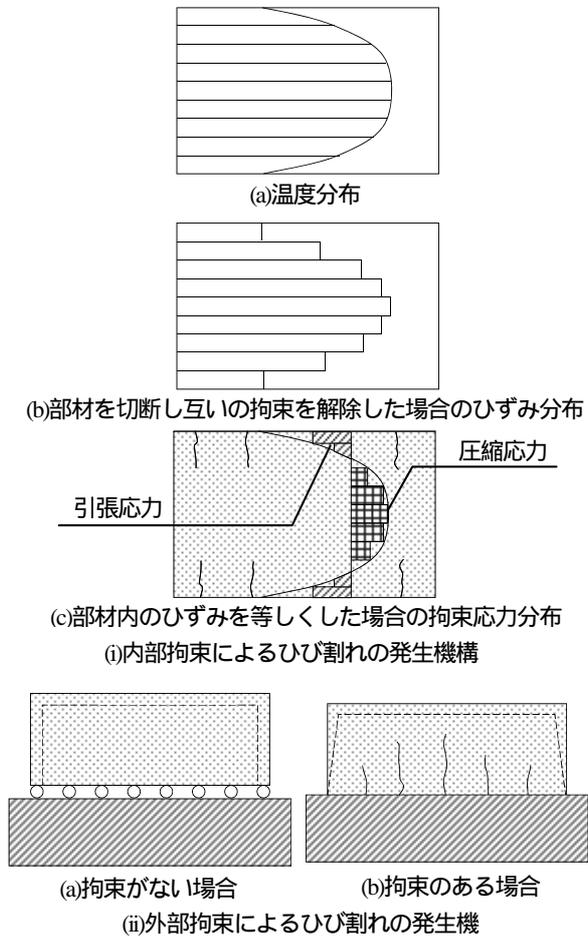


図-4 温度応力ひび割れの発生機構<sup>2)</sup>を参考

ムに状況を把握することができる。端末には携帯型タブレットを採用し、いつでも、どこでも管理者が容易に確認することが可能となる。すなわち、現場から離れた場所においても、コンクリートの幅広い知見を持っている技術者が養生管理システムを扱うことが可能となり、現場技術者と連携した品質管理を行うことができる。

本システムは図-4に示すような温度応力ひび割れの発生機構に応じて養生タイプを選択することが可能である。外部拘束ひび割れが卓越する場合は、コンクリート打設前に既設の旧コンクリートを人工的に暖めることが効果的<sup>3)</sup>であり、内部拘束ひび割れが卓越する場合は、コンクリート打設後にコンクリートの内外温度差を小さくすることが効果的<sup>4)</sup>である。本稿では、前者の養生タイプを「前養生」、後者の養生タイプを「後養生」と記すこととする。ただし、外部拘束ひび割れが卓越する場合においても「後養生」が有効な場合もある。

### (3)養生管理システムの適用手順

養生管理システムの適用手順を図-5のフローチャートに示す。以下に手順を列記する。

#### 養生タイプの選択

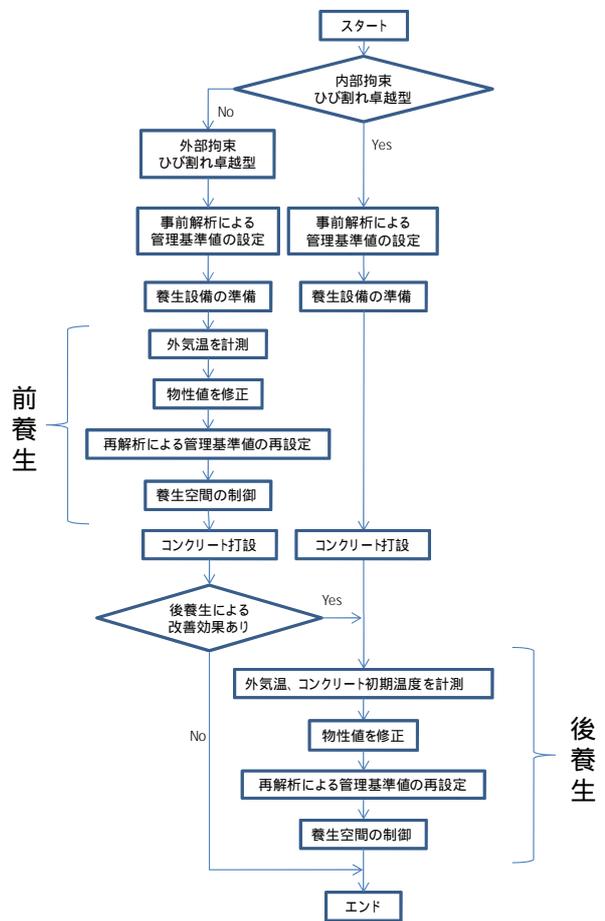


図-5 養生管理システムの手順

内部拘束ひび割れ卓越型、外部拘束ひび割れ卓越型の選択をする。以下、本稿では内部拘束ひび割れ卓越型のみ記述することとする。

#### 事前解析による管理基準値の設定

過去の気象データを基に外気温およびコンクリート初期温度を設定し、事前解析を行う。温度解析、応力解析は養生条件（養生温度、養生期間）を変化させたケース毎に解析を行い、管理基準値を設定する。

#### 養生設備の準備

養生条件に必要なジェットヒーターの位置および台数を決定、設置する。養生空間内の温度を均一にするため、最適に熱循環させることができるような送風機の位置、方向、台数を決定、設置する。また、熱電対や温湿度センサ、システム制御装置を設置する。

#### コンクリート打設

外気温、コンクリート温度等を計測

物性値を修正

コンクリート温度の解析値と計測値を比較し、発熱挙動に差がある場合、計測された養生空間温度を用いて逆解析を行い、物性値を修正する。

再解析による管理基準値の再設定

修正後の物性値および計測された養生空間温度を用いて、より精度の高い解析を実行し、で定めた管理基準値の効果確認を行う。効果の度合いにより、必要に応じて管理基準値を更新する。

養生空間の制御

管理基準値に従い温度、湿度、気流制御を行う。

### 3 実構造物への適用

コンクリート養生管理システムを四国横断自動車道富久工事で適用した。以下に適用現場の工事概要と特徴を述べる。

#### (1)四国横断自動車道について

四国横断自動車道は昭和62年の開通（善通寺～川之江JCT）以来、着実に建設が進められ、平成15年3月30日の高松中央IC～高松西ICの開通により香川県内から徳島県鳴門市に至るまでの高速ネットワークが完成、また香川県内においては瀬戸中央自動車道と、徳島県内においては神戸淡路鳴門自動車道とそれぞれ直結している。

現在は鳴門JCT（仮称）から徳島市、小松島市を經由し四国横断自動車道の起点である阿南市までの一日も早い開通を目指している（図-6参照）。

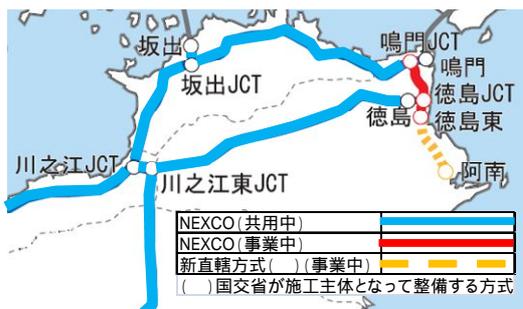


図-6 四国横断自動車道 整備区間

#### (2) 工事概要

工事名称：四国横断自動車道富久工事

発注者：西日本高速道路株式会社

工事場所：徳島県徳島市川内町（図-7）

工事内容：延長 2.6km、幅員 10.5m、切盛土量 580,000m<sup>3</sup>、ボックスカルバート 9基

コンクリート養生システム適用構造物：

ボックスカルバートSTA84+65.5の1BL側壁および頂版（写真-1、図-8および9参照）

施工時期：平成24年2月下旬から3月上旬



図-7 四国横断自動車道富久工事位置



写真-1 ボックスカルバート全景

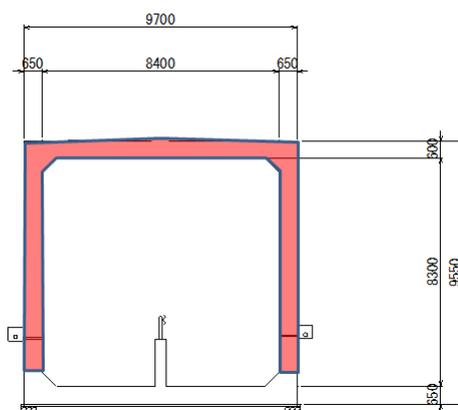


図-8 STA84+65.5 標準断面図

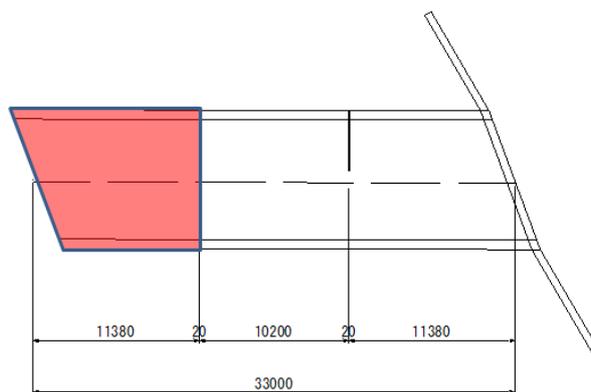


図-9 STA84+65.5 平面図

### (3)工事の特徴

本工事は、高松自動車道鳴門JCTと徳島自動車道ICとを結ぶ四国横断自動車道、約16kmのうち、徳島ICに接続する土工部延長2.6kmにおいて、吉野川河口付近の軟弱地盤上に約10m盛土し、その盛土内を横断するボックスカルバートを9基築造するものである。

徳島名産の鳴門金時およびレンコン畑の広がる平野部に施工されるボックスカルバートは、海風の影響を強く受け、冬季は氷点下となる日もある。したがって、コンクリート構造物には温度ひび割れが生じ易い環境下での施工となる。そのため、寒中コンクリートの養生対策が品質確保のために重要となる。

#### 3.1 事前解析による管理基準値の設定

過去の気象データを基に外気温およびコンクリート初期温度を設定し、養生条件（養生温度、養生期間）を変化させたケース毎に温度応力解析（事前解析）を行い、最適な管理基準値を設定した。なお、解析コードは、非定常・非線形三次元FEM温度応力解析プログラム「ASTEAMACS」を用いた。

解析モデルは図-10のようなボックスカルバートの対象条件を考慮した1/4モデル（ウィング部は除外）とし、解析に用いた物性値は表-1に示すとおり設定した。

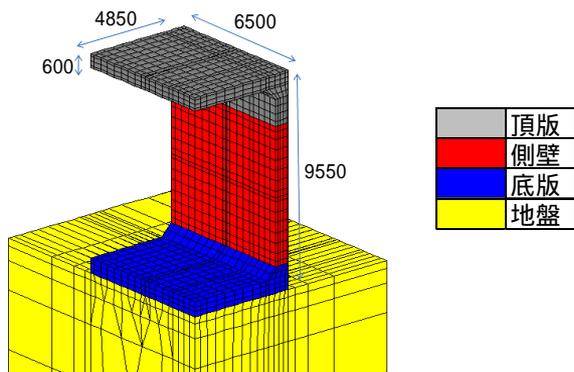


図-10 解析モデル

表-1 解析に用いた物性値

項目	単位	底板コンクリート	側壁・頂板コンクリート
セメント種類	-	高炉B種	
単位セメント量	kg/m <sup>3</sup>	377	368
熱伝導率	W/m	2.7	
密度	kg/m <sup>3</sup>	2600	
比熱	kJ/kg	1.15	
ポアソン比	-	0.2	
線膨張係数	μ/	10	
断熱温度上昇特性		$Q_{(t)} = Q_{\infty} (1 - e^{-(t-t_0)^n})$	
圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書による	
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書による	
ヤング係数	N/mm <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書による	
初期温度		10	
熱伝達率	W/m <sup>2</sup>	コンクリート標準示方書による	

表-2 解析ケースと効果比較

ケースNo	養生方法	養生温度	養生条件		効果
			開始	終了	
1	無対策	外気温	-	-	-
2	前養生	20	打設前 1.0日	打設前 0.5日	×
3		10	打設前 1.0日	打設前 0.5日	×
4	後養生	10	打設後 1.5日	打設後 4.0日	
5		15	打設後 1.5日	打設後 3.0日	
6		15	打設後 1.5日	打設後 4.0日	
7		15	打設後 1.5日	打設後 5.0日	
8		20	打設後 1.5日	打設後 4.0日	

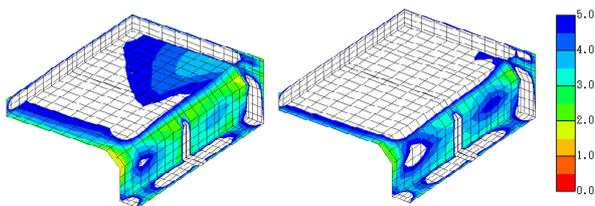


図-11 ひび割れ指数分布の比較

表-2に解析ケース毎の養生条件（養生温度、養生期間）および ひび割れ指数の改善効果の比較を示す。改善効果が最も良好な結果が得られたケースはNo.6であった。図-11に無対策（ケースNo.1）と養生システム適用（ケースNo.6）のひび割れ指数コンターの比較を示す。本図より、全体的にひび割れ指数は改善傾向にあり、特に、頂版部の前面でひび割れ指数が低減されていることが分かる。

よって、最適な養生条件は、養生システム適用期間をコンクリート打設後「1.5～4.0日」、養生温度は15.0 を管理基準値に設定した。

#### 3.2 設備および計測装置

##### (1)ジェットヒーターの台数

寒中コンクリート施工指針・同解説<sup>⑤</sup>に基づき、養生温度15 に必要なジェットヒーターの台数を4台とした。

##### (2) 設備配置

ジェットヒーター4台は図-12のように配置した。その内2台は孔開き風管タイプを使用し、空間内を均一に暖めるように配慮した。また、熱風による乾燥防止のため、風管直下には十分に湿らせた養生マットを敷くと同時に底版上は適度に散水を行い、側壁は表面をエアキャップシートで覆い水分の逸散を防止した。写真-2～5に設備状況を示す。

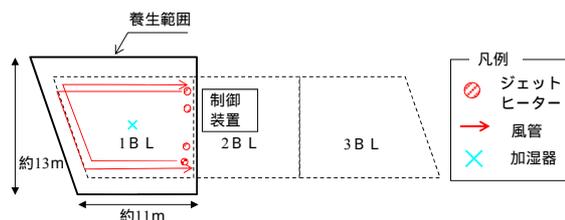


図-12 設備配置図



写真-2 養生設備外観



写真-3 制御装置の外観



写真-4 制御装置の内部



写真-5 ジェットヒーター配置状況

### (3)計測装置

コンクリートの内部温度と外部温度を計測するため、図-13の位置に熱電対を設置した。また、養生温度・湿度および外気温・湿度を計測するため、養生空間の内外に温湿度計を設置した。

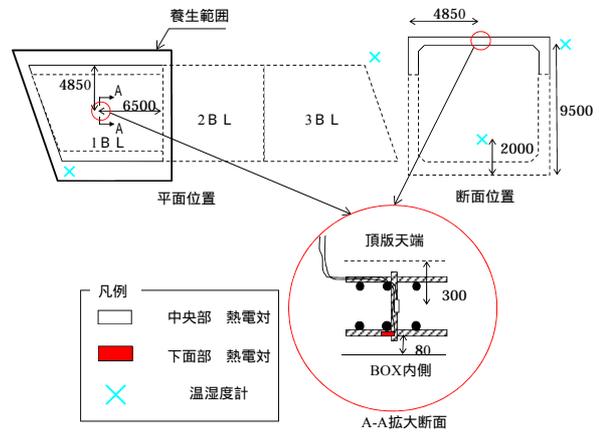


図-13 熱電対および温湿度計の設置箇所

## 3.3 コンクリート打設

頂版コンクリートは2012年3月8日に打設した(写真-6)。熱電対の設置箇所である頂版中央部のコンクリート打設時間は16時、コンクリート初期温度は14.0であった。



写真-6 コンクリート打設状況

## 3.4 物性値の修正

コンクリート打設から約1日経過後、コンクリート温度の解析値と計測値を比較した。その結果、図-14(a)に示すとおり、温度および温度上昇勾配に多少の違いが見られた。そこで、計測した養生空間内の温度およびコンクリート温度を用いて逆解析を行い、コンクリート発熱特性の修正を行った。

発熱特性式はコンクリート標準示方書【設計編】<sup>6)</sup>に準拠し、次式を適用した。

$$Q_{(t)} = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma(t-t_0)^S})$$

ここに、 $t$ : 材齢(日)

$Q_0$ : 材齢  $t$  日までの断熱温度上昇量( )

$Q_{\infty}$ : 最終断熱温度上昇量( )

$\gamma$ : 断熱温度上昇速度を表す係数

$t_0$ : 温度上昇の原点に関するパラメータ

$S$ : 温度上昇速度に関するパラメータ

$Q_{\infty}$ および $\gamma$ の算定に用いる係数を表-3に示す。

表-3  $Q_c$ および $\gamma$ の標準値<sup>6)</sup>

セメント	打込時の温度	$Q_c = aC + b$		$\gamma = gC + h$	
		a	b	g	h
高炉セメントB種	10	0.13	13.2	0.0013	0.034
	20	0.13	11.9	0.0018	0.148
$C=368\text{kg/m}^3$	30	0.13	10.9	0.0023	0.396

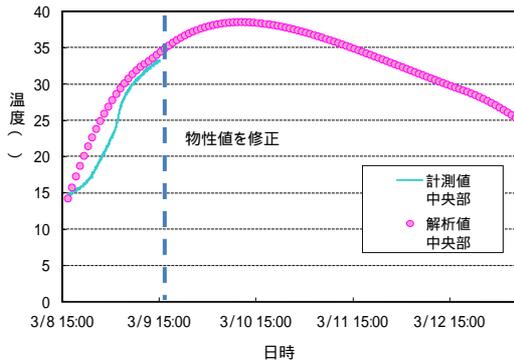


図-14(a) 物性値の修正

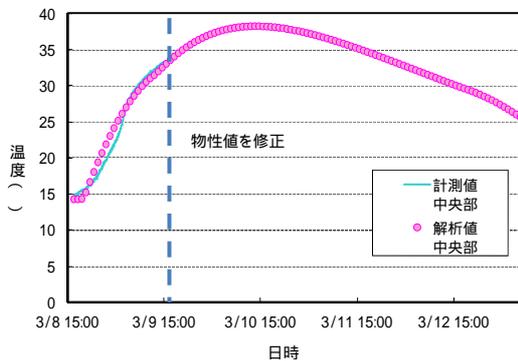


図-14(b) 物性値の修正

逆解析における発熱特性の修正は、計測値のコンクリート温度が事前解析の値より低かったことから $Q_c$ 値を61から60へ、計測値の温度勾配が事前解析の値より小さかったことから $\gamma$ 値を0.51から0.60へ、計測値の温度上昇開始時間が事前解析の値より遅かったことから $t_0$ 値を0から0.1へ修正した。その結果、図-14(b)に示すとおり、解析で発熱挙動をほぼ再現することができた。

### 3.5 再解析による管理基準値の再設定

前述の修正した物性値を用いて、実挙動の再現精度の高い解析を行い、事前解析で設定した管理基準値による養生システムの適用効果および妥当性を検証した。

解析は、事前解析で設定した管理基準値を基本として養生期間と養生温度を変化させ、表-4に示すようなケースで実施した。その結果、ひび割れ指数の改善効果はケースNo.3で最も高くなり、ひび割れ指数の改善率は無対策に比べ14.5%となった。図-15にケースNo.3のひび割れ

指数コンターを示す。

上記の結果より管理基準値は、最適な養生期間をコンクリート打設後「1.5~4.0日」を打設後「1.0~4.5日」へ変更し、養生温度は15.0を管理基準値とした。さらに、養生システムを停止した際の養生空間の急激な温度変化を抑制するため、給熱養生の終了前は外気温へすり付けよう設定した。

表-4 解析ケースと効果比較

ケースNo	養生方法	養生条件				効果
		養生温度	養生期間			
			開始	終了		
1	後養生	15	打設後 1.5日	打設後 4.0日	-	
2		15	打設後 1.0日	打設後 4.0日	-	
3		15	打設後 1.0日	打設後 3.75日	○	
		15.2	打設後 3.75日	打設後 4.5日		
4	20	打設後 1.0日	打設後 4.0日	-		

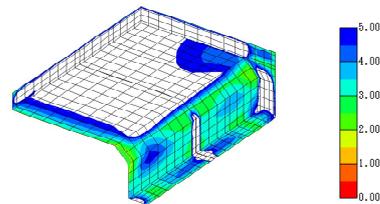


図-15 ケースNo.3のひび割れ指数分布

### 3.6 養生管理システム適用効果の検証

外気温と養生空間内の温度の経時変化を図-16に示す。養生空間内の温度は、管理基準値15.0に対し、13.5~16.5の範囲で自動制御することができた。また、給熱養生の終了時は外気温へ養生空間内の温度を自動ですり付ける制御を行うことができた。

コンクリート温度の変化を図-17に示す。養生システムを稼働させた期間で、無対策時の再現解析結果に比べコンクリート温度が上昇しているのが分かる。温度応力ひび割れ対策では、コンクリート温度の下降勾配をなるべく緩やかにすることが有効である<sup>7)</sup>ことから、温度応力ひび割れの低減に効果があったことが確認できる。また、コンクリート内外温度差も小さくなっており、内部拘束ひび割れの低減に効果があったものと考えられる。

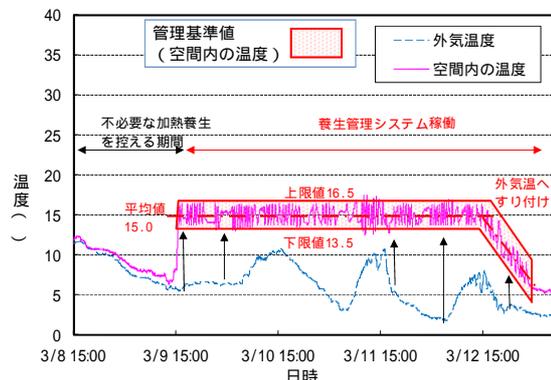


図-16 外気温と養生空間内温度の関係

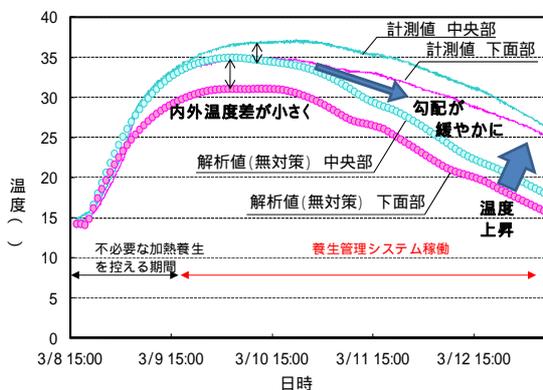


図-17 コンクリート温度の変化

### 3.7 施工環境の測定

#### (1) 風速

養生設備の外で計測した風速値は、最大瞬間風速10m/sを超える強い風の時もあった。しかし、外部足場に養生シートを設置し、ボックスカルバート全体を覆ったことから、風の影響を最小限に抑え、空間内の急激な温度変化やコンクリート表面の水分逸散を防止することができた。

#### (2) 騒音および酸素濃度

養生システムは昼夜で稼働させることから、近隣住民への配慮が重要となる。そこで、システム稼働時の騒音の測定を夜間に実施した。測定は、施工箇所から約10m離れた敷地境界で行った。

また、養生空間内はシートで覆われていることから、ジェットヒーターの不完全燃焼による酸欠災害を防止する目的で作業時間内に酸素濃度を計測し場内に掲示した。

騒音および酸素濃度の測定結果を表-5に示す。測定値は、規格値内に収まり、周辺環境への影響がなく、安全な作業環境を確保することができたことが分かる。

表-5 騒音および酸素濃度 測定結果

	計測値	規格値
騒音	50dB	85dB以下
酸素濃度	20.90%	18%以上

### 4 まとめ

コンクリート養生管理システムの特徴は、温度応力解析から求めた最適な養生温度になるよう自動的にジェットヒーターを起動させ、養生空間の温度を自動制御することである。これにより、過熱養生や急激な温度低下を

防ぎ、初期ひび割れの低減を図ることがができる。また、養生空間内の湿度を自動制御することも可能である。

コンクリート養生管理システムを四国横断自動車道富久工事に実適用した成果を以下にまとめる。

養生温度の制御：養生システムを用いてジェットヒーターを制御することで昼夜間における外気温の寒暖差を小さくし、また必要以上にコンクリート温度を上げないように養生空間内の温度を自動制御することができた。また、給熱養生終了時の外気温へのすり付けによる急激な養生温度の低下を防止することができた。

ひび割れの低減：最適な養生空間内の温度に制御することで、ひび割れ指数の改善が図られ、温度応力によるひび割れが低減された。

施工環境：養生シートでボックスカルバート全体を覆ったことで、風の影響を最小限に抑え、急激な養生空間内の温度の変化やコンクリート表面の水分逸散を防ぐことができた。また、騒音と酸素濃度の測定結果より、周辺環境への影響は無く、安全な作業環境を確保することができた。

以上より、本システムの適用は、初期ひび割れを低減させ、ボックスカルバートの品質向上に寄与できたものとする。また、今後のコンクリート工事においても積極的に本システムを適用し、コンクリート構造物の品質向上に努めていく所存である。

#### 謝辞

本システムの開発において多大なる協力を頂きました計測技研(株)の橋村氏、藤原氏に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書【施工編】
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'11
- 3) 小野 定，榎田泰仁：マスコンクリートの外部拘束による温度ひび割れ制御について，セメント技術年報，1980
- 4) 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
- 5) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説
- 6) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書【設計編】
- 7) 山口県土木建築部：コンクリート構造物ひび割れ抑制対策資料【対策資料】，2007