

コンクリート養生管理システムの開発と実用化

クラコン養生管理システム

西村直人・市川晃央・西村和夫

コンクリートの養生は、施工環境条件を考慮し、打ち込み後の一定期間は硬化に必要な温度および湿度に保ち、有害な作用の影響を受けない方法を定め、コンクリートが所要の品質を確保できるように実施しなければならない¹⁾。コンクリート養生管理システムは、各種解析から求めた最適な養生条件になるよう自動的に給熱（冷熱）機・加湿器・送風機を起動させ、養生空間内の自動制御を行うことで温度応力ひび割れや、初期の乾燥収縮ひび割れによる初期欠陥を抑制する。また、ウェブカメラや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。

本システムは実際のボックスカルバート工事に実適用し、その効果を確認している²⁾。

キーワード：養生，自動制御，温度応力解析，湿気移動解析，熱流体解析，情報化施工

1. はじめに

今回開発したコンクリート養生管理システム（クラコン養生管理システム NETIS：KT-120109-A）の構成は、最適養生条件を各種解析より算出するソフト部分と、その最適養生条件を実現させる養生装置のハード部分からなる（図-1）。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。

ソフト部分では温度応力解析や湿気移動解析を行い、ひび割れの発生を抑制する最適養生条件を求める。

また、熱流体解析により養生空間の上下間に発生する温度差を解消し、均一な養生環境とする送風機の配置を求めることもできる。

ハード部分の養生装置は、最適養生条件に従い養生を行うことで、温度応力や乾燥収縮に起因したひび割れを抑制する。本装置は寒中コンクリート対策としてのジェットヒーターや電熱マットとの連動、暑中コンクリート対策としての加湿器との連動が可能である。また、パイプクーリングにおける通水量や水温の管理もできる。

本システムは、ボックスカルバートやトンネル覆工、橋梁下部工といった各種コンクリート構造物へ適用可能である。

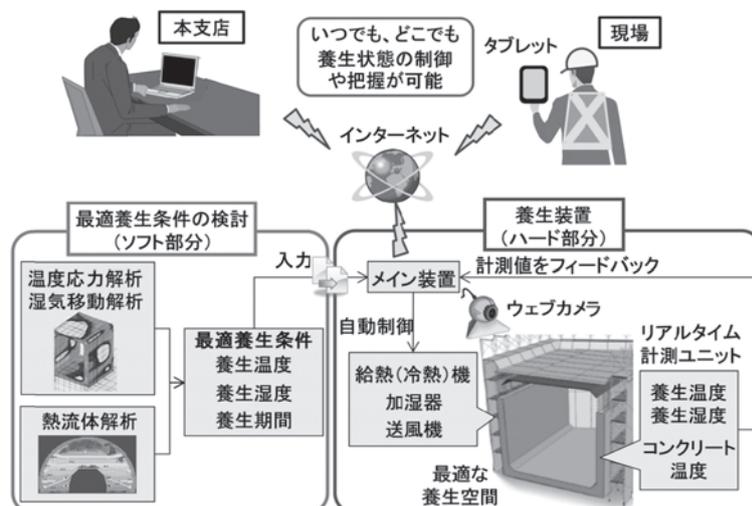


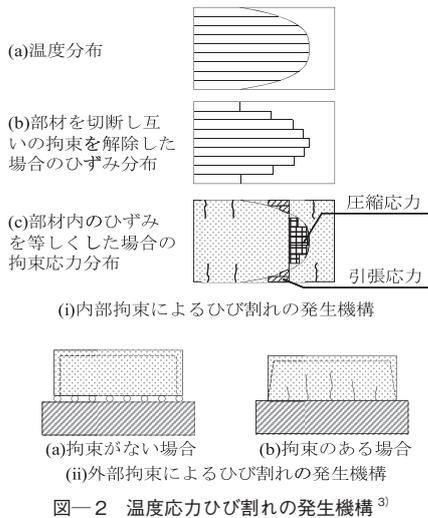
図-1 クラコン養生管理システム (NETIS: KT-120109-A) の構成

2. 最適養生条件の検討

本システムでは解析により、各種ひび割れに対する最適な養生条件を求める。以下にひび割れの種類と解析の概要を説明する。

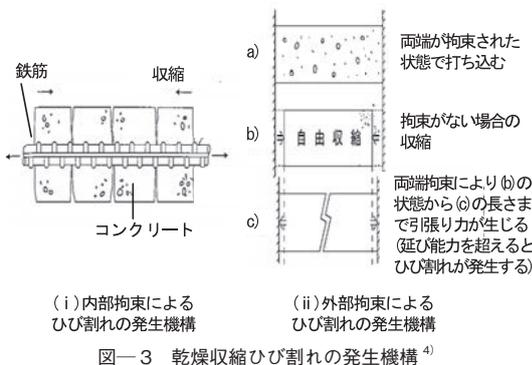
(1) 温度応力ひび割れ

温度応力ひび割れは、セメントの水和発熱によって起こるコンクリートの体積変化によって発生する。温度ひび割れの発生機構は図-2のように内部拘束によるものと外部拘束によるものの二種類がある。



(2) 乾燥収縮ひび割れ

低湿度環境下ではコンクリートの乾燥収縮が進行し、圧縮強度の発現が十分でない弱材齢時には初期乾燥収縮ひび割れが発生し易くなる。図-3に乾燥収縮ひび割れの発生機構を示す。



(3) 温度応力、湿気移動解析による養生条件の検討

温度応力ひび割れと乾燥収縮ひび割れの発生度合いを判定するために、温度応力解析および湿気移動解析を行う。手順としては①解析モデルの作成(図-4)、②解析条件の入力、③計算、④結果出力となる。この

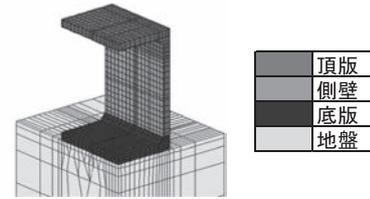


図-4 解析モデル (ボックスカルバートの例: 1/4モデル)

際、②解析条件のひとつである養生条件(養生温度、養生湿度、養生期間)を変化させた検討を行い、ひび割れが目標値を満たす最適な養生条件を求める。

(4) 熱流体解析による養生空間の均一性の検討

解析を行う上で養生環境は均一状態を仮定しているが、実際の現場環境では養生温度が異なる場合もある。例えば、トンネル覆工コンクリートを打設する際、外気温が5℃以下では、セメントをシートなどで囲った養生空間をジェットヒーターで給熱養生することがある。この際、養生空間では上下間に温度差が発生している。そこで、図-5に示す解析モデルで熱流体解析を行い、養生空間内が均一温度になるような送風機の配置を求める。これにより養生空間内における上下間の温度差が解消されるため(図-6)、過熱養生箇所がなくなり、温度応力ひび割れの低減を図ることができる。

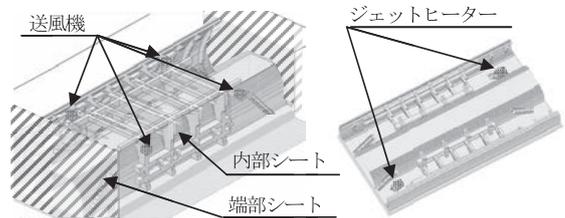


図-5 熱流体解析に用いたセメントの3次元モデル⁵⁾

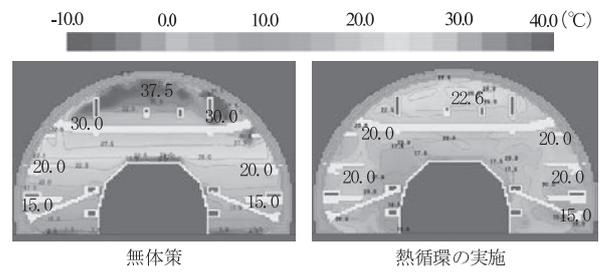
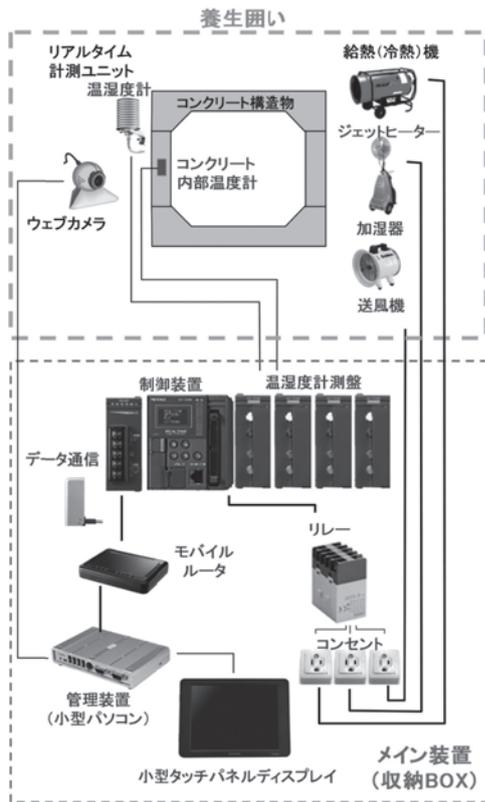


図-6 熱流体解析の結果 (トンネル覆工の例)⁵⁾

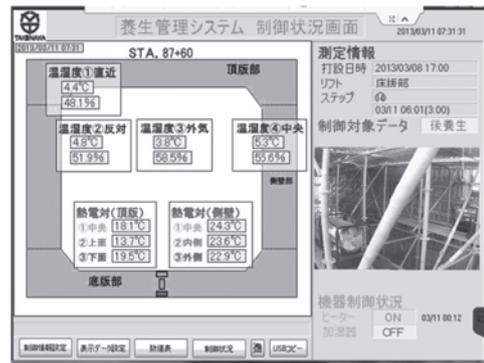
3. 養生装置

養生装置の構成は、図-7に示すようにメイン装置とリアルタイム計測ユニット、給熱(冷熱)機、ウェブカメラからなる。メイン装置は管理装置、給熱(冷熱)機を制御する制御装置、養生空間の温湿度・コンクリート温度を記録する温湿度計測盤からなる。



図一七 養生装置の構成

ブレットを用いて、いつでも、どこでも管理者が容易に養生状況を確認することが可能となる(図一八)。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。これにより、現場同様にリアルタイムな養生計測値を把握することができ、ウェブカメラ(写真一)を用いることで、緊急時にも迅速に対応することが可能である。



図一八 遠隔地からの現場確認(パソコン画面)

(1) 制御の仕組み

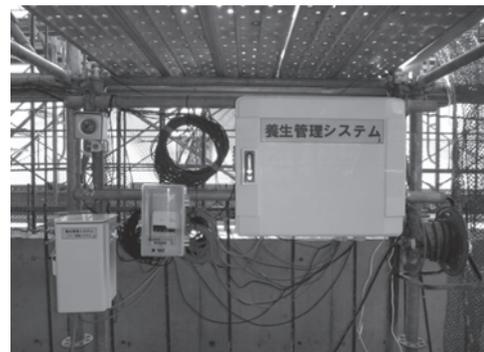
養生温湿度は、解析で求めた最適温湿度と現場計測した温湿度を比較し、リレーを介して給熱(冷熱)機や加湿器の主電源を入/切することにより制御する。一方、コンクリート温度は、養生温度を制御することで間接的に管理する。これはコンクリートの熱伝導率が空気より大きいため、コンクリート温度を直接的に管理しようとした際に時間遅れが生じるためである。また、養生空間内の上下間温度差が大きくなった際にもリレーを介して送風機の主電源を入/切し、養生空間の均一性を保つことも可能である。

(2) リアルタイム監視

温度応力ひび割れを抑制する際、コンクリート温度の計測値が解析値と整合しているかを確認する必要がある。計測値と解析値がかけ離れている場合には解析物性値を変更するなどして再解析を行う。そのため、計測値をリアルタイムに取得し、解析値との違いを把握することが重要となる。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、簡単に計測値の確認ができ、本支店などの遠隔地ではインターネットを介して測定データの閲覧やシステム制御も可能である。

(3) 遠隔管理

本支店などの遠隔地ではインターネットや携帯型タ



写真一 ウェブカメラとメイン装置

(4) 汎用的な機械および設備が使用可能

給熱(冷熱)機・加湿器・送風機は汎用的な機械が使用可能である。また、給熱機に電熱マットや冷熱機にパイプクーリングなどを用いる場合は養生空間を作る付帯設備は必要ない。一方、ジェットヒーターや加湿器を使用する場合は、写真二のように養生空間



写真二 養生シート設置状況



写真-3 温湿度計（無線タイプ）

を作る必要があるが、シートは現場にある汎用的な材料で対応可能である。現場状況に合わせて養生空間を小さくすることで熱効率を上げることもできる。現状は計測装置や給熱装置への配線があり、施工過程で配線が支障になることがある。今後は写真-3のような装置を活用し無線化を目指す。

4. 現場適用事例²⁾

コンクリート養生管理システムを寒中コンクリート養生に適用した一例を紹介する。

(1) 適用構造物の概要

適用箇所：ボックスカルバート頂版（図-9）

構造物寸法：内空断面 8.4 m × 8.3 m，外寸 9.7 m × 9.55 m，延長 11.38 m

コンクリート打設日時：平成 24 年 3 月 8 日 15 時

システム適用期間：平成 24 年 3 月 8 日～12 日

適用期間の最低外気温：2℃

設備：養生シート、ジェットヒーター、孔空き風管（図-9）、加湿器

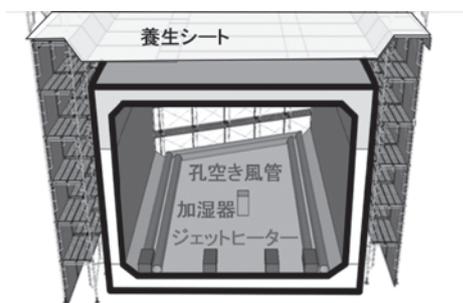


図-9 適用構造物および設備配置

(2) 解析による養生条件の検討

現場計測された外気温およびコンクリート初期温度を用い、養生条件を変化させたケース毎に温度応力解析を行い、最適な養生条件を設定した。

表-1 に解析ケース毎の養生条件，およびひび割

れ指数の改善効果の比較を示す。ここで、ひび割れ指数 $I_{cr}(t)$ は以下の式で示される。

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t)$$

$f_{tk}(t)$ ：材齢 t 日のコンクリート引張強度

$\sigma_t(t)$ ：材齢 t 日のコンクリート最大主引張応力度

ひび割れ指数は数値が大きいほどひび割れしにくいことを示しており、改善効果が最も良好な結果が得られたケースは No.3 であった。図-10 に無対策（ケース No.1）と養生管理システム適用（ケース No.3）のひび割れ指数分布の比較を示す。本図より、全体的にひび割れ指数は改善傾向にあり、ひび割れ指数の改善率は無体策に比べ 14.5% であった。よって、最適な養生条件は、養生期間が材齢 1.0～4.5 日、養生温度は 15.0℃とした。さらに、養生を終了する際の急激な温度変化を抑制するため、終了時は外気温へすり付けるよう設定した。

表-1 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	無対策	外気温	-	-	-	
2	養生システム	15℃	打設後 1.0 日	打設後 4.5 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 3.75 日	○	
		20→2℃	打設後 3.75 日	打設後 4.5 日		
5	20℃	打設後 1.0 日	打設後 4.5 日	○		

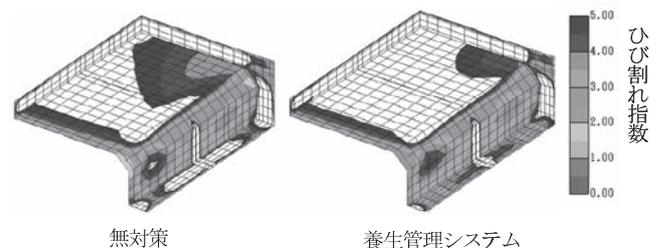


図-10 ひび割れ指数分布の比較

(3) 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-11 に示す。養生空間内の温度は、目標値の 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経時変化を図-12 に示す。養生管理システムを稼働させた期間で、コンクリート温度が無対策時に比べ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⁶⁾ことから、温度応力ひび割れの低減に効果

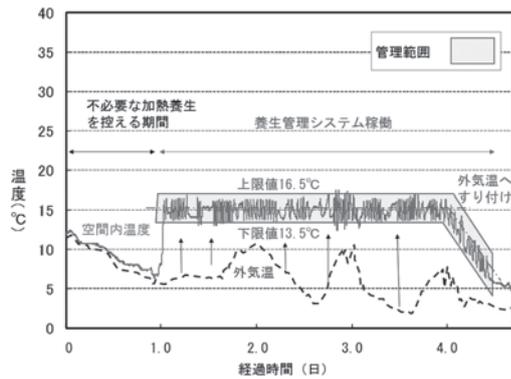


図-11 外気温と養生空間内温度の関係

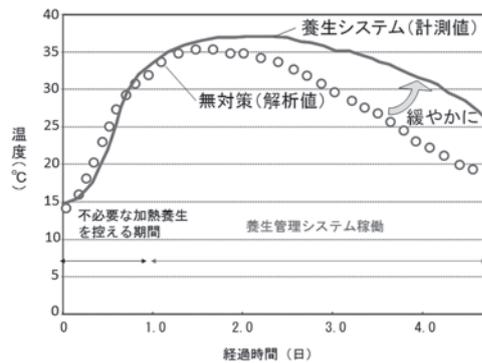


図-12 コンクリート温度の変化

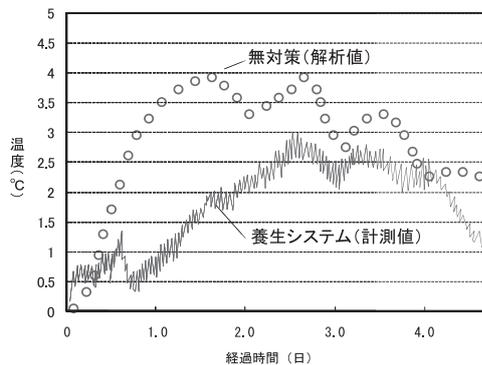


図-13 コンクリート内外温度差

があったことが確認できる。また、図-13に示すように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する。

5. おわりに

コンクリート養生管理システムの特徴は、温度応力解析や熱流体解析、湿気移動解析から求めた最適な養生温度・湿度になるよう自動的に給熱（冷熱）機・加湿器・送風機を起動させ、養生空間の温度・湿度を自動制御することである。これにより、コンクリートの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できる。また、養生空間内を適切な湿度に自動制御することで初期乾燥ひび割れ防止にも効

果がある。

本システムは、本報で詳述した寒中コンクリート養生対策の他にも暑中コンクリート養生などに実適用を行っており、以下に適用の成果をまとめる。

- ①温度応力ひび割れの低減：最適な養生空間内の温度に制御することで、コンクリートに発生する温度応力が低減し、温度応力ひび割れが抑制された。
- ②初期乾燥収縮ひび割れの低減：型枠脱型直後の加湿制御により高湿度な養生環境が保たれ、圧縮強度が十分確保できていない若材齢時コンクリートの初期ひび割れを防止した。
- ③リアルタイム監視、遠隔管理：現場に設置したウェブカメラによる自動制御状況の確認や、コンクリート温度・雰囲気温湿度のリアルタイム監視によりコンクリートに最適な養生となるよう即時対応を実現した。

以上より、本システムの適用は、各種初期ひび割れを低減させ、コンクリート構造物の品質向上に寄与できたものとする。また、今後も積極的に新たな技術を導入し、システム改良することで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。

JICMA

《参考文献》

- 1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書【施工編】
- 2) 岡崎順一ほか：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，土木建設技術発表会，2012
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 '11
- 4) 十河茂幸ほか：コンクリートのひび割れがわかる本，セメントジャーナル社，2003.7
- 5) 西村直人ほか：セントル内の養生温度差が覆工の温度応力ひび割れに与える影響，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，2013（投稿中）
- 6) 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

【筆者紹介】



西村 直人（にしむら なおと）
（株）竹中土木
技術・生産本部 技術部



市川 晃央（いちかわ あきお）
（株）竹中土木
技術・生産本部 技術部
課長



西村 和夫（にしむら かずお）
首都大学東京大学院
都市環境科学研究科
教授