

コンクリート養生システムの開発

田村 隆弘・坂本 修・上野 秀昭

コンクリート工事における養生は、構造物の品質を左右する重要な要素の一つである。ここでは、コンクリートの硬化初期に発生する温度応力と乾燥収縮の抑制を目指した“コンクリート養生システム”の開発と、実際の工事への適用性について報告する。システムの開発過程で行った実験からは、無筋コンクリートに比較して鉄筋コンクリートの方がひび割れが多発するといった基本情報や、養生システムの効果を確認した。また、システムの実用性を確認するために2基の貯水槽で比較工事を行った結果から、養生システムで管理した貯水槽は、従来の養生方法で管理したものに比較して表面の状態もよく、長期のひび割れ性状も優れていることを確認した。

キーワード：コンクリート工事，養生，ひび割れ，ひび割れ対策，温度管理，湿度管理，工事環境

1. はじめに

(1) 背景

近年、コンクリート構造物の耐久性の確保が重視され、コンクリート構造物の建設現場では、高品質の仕上がり求められる。しかし、実際の建設現場では気温や湿度は常に変化し、また、コンクリートは硬化時に水和熱による温度変化を起こす。従って、硬化初期の段階で、コンクリートは内部と外部の温度変化や湿度の影響を受ける。弱材齢の（つまり、生まれたての）コンクリートは、引張強度が小さいことから、これらの環境要因は重要な問題である。すなわち、これらの外的あるいは内的作用による応力がコンクリートの引張強度を超えると、ひび割れが発生する。このひび割れは、コンクリート構造物の耐久性や機能性に影響があることから、これまでその発生原因や対策について、多くの研究が行われてきた¹⁾。

コンクリートの養生は、建設現場におけるひび割れ対策の一つであり、各種の技術が提案されている。しかし、その性能については、定量的な評価が困難なことから決定的な技術が確立されるには至っていない。

本報は、建設現場におけるコンクリートの養生をより確実に行うための養生システムの開発に取り組んだことについて報告する。

ここで言う養生システムは、建設現場に於いて温度と湿度をコントロールすることで、コンクリート部材を保育器の中に置かれた新生児のように適切に管理す

ることを目指し、エアコンと加湿器で構成している。

システム開発のための基礎実験では、温度変化とコンクリートの応力状態の関係を測定し、実験結果から、コンクリートに発生するひび割れは、養生システムによってコントロールすることが可能であることを確認した。ここでは、基礎実験の成果をもとに、開発したシステムを、実際の構造物への適用した結果についても報告する。

(2) ひび割れ発生要因

コンクリートが荷重条件や環境条件で、ひび割れの発生しやすい材料であることは良く知られている。打設後間もなく発生するひび割れは、主に、水和熱と乾燥収縮に起因している。水和熱は、コンクリートが硬化する過程におけるセメントと水による水和反応によって発生し、通常使用されるコンクリートでも、断熱環境下では50℃程度の温度上昇が起こる。コンクリート温度の上昇により、コンクリート部材は膨張するが、この場合は、この膨張が拘束されても部材に圧縮応力が発生するため特に問題となることは少ない。しかし、上昇したコンクリート温度が、外気温まで低下するとき部材は収縮する。この収縮が何らかの拘束体によって拘束を受けるとき、コンクリートに引張応力が生じる。一方、コンクリートの乾燥収縮と呼ばれるものには、コンクリート表面から水分が逸散する乾燥収縮とコンクリート内部で水和反応が進行することで内部に乾燥状態が広がってゆく自己収縮がある。こ

これらの収縮現象が、何らかの拘束体によって制限を受けると、コンクリートには引張応力が生じる。

これらの水和熱や乾燥収縮による引張応力や、これに加えて外力による引張応力がコンクリートの引張強度を超えた場合には、コンクリート部材にはひび割れが発生する。従って、建設現場環境下のコンクリートの温度や湿度をコントロールする「養生」は、ひび割れ対策としても重要な役割を持っている。

2. 養生システムの開発

(1) 基礎実験

コンクリート養生システムの開発にあたり、ひび割れ発生要因を確認するための基礎実験を行った。実験に使用したコンクリートの配合を表-1に、また、実験条件を表-2に示す。

図-1は、実験に使用した無筋、あるいは鉄筋コンクリートの壁供試体で、高さは1mと30cmの2つのタイプを準備した。各供試体で、部材高さの1/2の位置のコンクリート内部温度を測定した。また、コンクリート打設後、供試体側面の上下16箇所を測定し、同時に、コンクリート表面のひび割れ状況を観察した。

表-1 配合設計

Mix	W/C	S/A	Unit weight (kg/m ³)					
Series	note	(%)	(%)	Cement	Water	Sand	Gravel	admixture
No.1	18-8-20(BB)	65	45.9	256	166	855	1045	4.86
No.2	18-18-20(BB)	65	49.1	291	189	869	935	5.53
No.3	27-8-20(BB)	50	42.8	332	166	769	1066	6.31
No.4	27-18-20(BB)	50	45.6	382	191	769	952	7.26

note : required average strength - slump - maximum size of aggregate
 (BB) : type of cement type : portland blast-furnace slag cement
 W/C = water-cement ratio
 S/A = absolute fine aggregate ratio

表-2 実験条件

Specimens No.	Mixture Series No.	cure	length (mm)	width (mm)	height (mm)	rebar	restraint
1	No.2	non-cure	10,000	300	1,000	RC	under restraint
2	No.4					RC	
3	No.2					C	
4	No.4					C	
5	No.1				RC	300	without restraint
6	No.3				RC		
7	No.1				C		
8	No.3				C		
9	No.4	normal cure	10,000	1,000	RC	under restraint	
10					C		
11					RC		
12		C					
13		RC					
14		systematic cure			C		

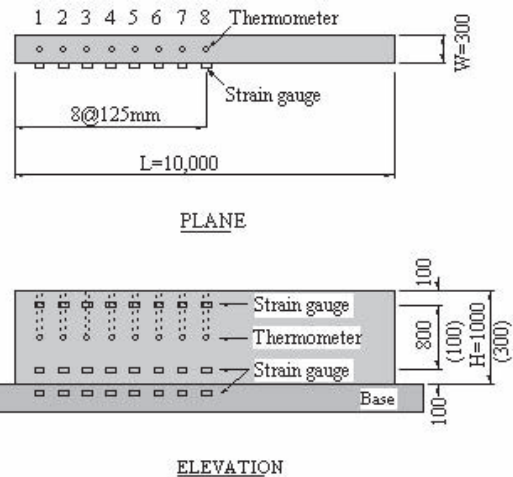


図-1 実験供試体概要

(2) 養生試験

図-2は、供試体を包み込んだ養生システムの概要を示している。養生システムは、エアコン、加湿器、そして養生シートで構成している。装置の性能については表-3に示す。なお、養生期間は、土木学会の基準に従い10日とした。

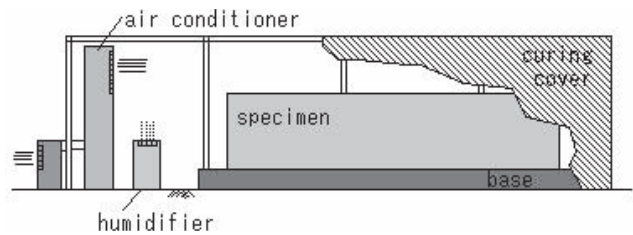


図-2 養生システムの概要



写真-1 養生システムの試験

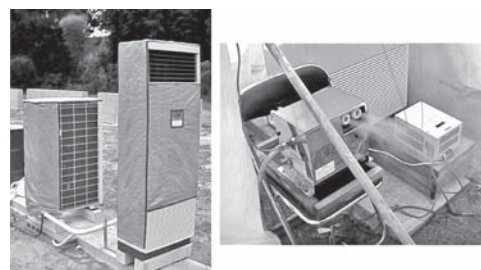


写真-2 養生システムに使用したエアコンと加湿器

表一3 養生システム機器

管理項目	機械装置名	能力
温度管理	エアコンディショナー	冷房 14 kW, 暖房 16 kW
湿度管理	加湿器	有効加湿量 1.0 kg/h

(3) コンクリート温度の解析

供試体の内部温度は、土木学会の算定方法に従い解析した。解析のための材料特性は、表一1を参考とした。

(a) 断熱温度上昇

コンクリートの硬化の過程における断熱温度上昇量は以下の(1)式により求めた²⁾。

$$Q_{(t)} = Q_m (1 - e^{-\gamma t}) \tag{1}$$

ここで、

- $Q_{(t)}$: 断熱温度上昇量 (°C)
- Q_m : 断熱温度上昇に関する係数
- γ : 温度上昇に関する係数
- t : 日数

ここで、係数 Q_m と γ は、以下の表一4を参照する。

表一4 Q_m と γ

Type of cement	Temperature of fresh concrete	$Q_{(t)} = Q_m (1 - e^{-\gamma t})$			
		$Q_m = aC + b$		$\gamma = gC + h$	
		a	b	g	h
BB	23.0 (°C)	0.10	15.0	0.0028	0.245

例えば、供試体 No.4 では、

$$Q_m = 0.10 \times 382.0 + 15.0 = 53.2,$$

$$\gamma = 0.0028 \times 382.0 + 0.245 = 1.315.$$

となり、これにより断熱温度は、以下の式で求められる。

$$Q_{(t)} = 53.2 (1 - e^{-1.315t}).$$

(b) コンクリート内部温度

先に求めた断熱温度上昇量を用いて、コンクリートの内部温度は、例えば、以下のシュミットの式から得られる^{2), 3)}。

$$T_i = 1/2 (T'_{i+1} + T'_{i-1}) + \Delta Q_{(t)} \tag{2}$$

ここで、

T_i : i 点の温度

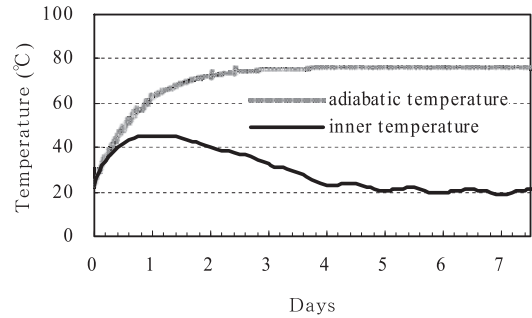
T'_{i+1}, T'_{i-1} : Δt 日目の i 点の両隣の温度

区間材令 Δt と構造物を分割した長さ Δw の関係は、

$$a \Delta t / (\Delta w)^2 = 1/2 \tag{3}$$

ここで、部材幅 $w = 0.3 \text{ m}$ と熱拡散率 $a = 0.08 \text{ m}^2/\text{day}$

の場合、 Δt は 0.035 になる。解析から得られた供試体の内部温度と断熱温度上昇量を図一3に示す。



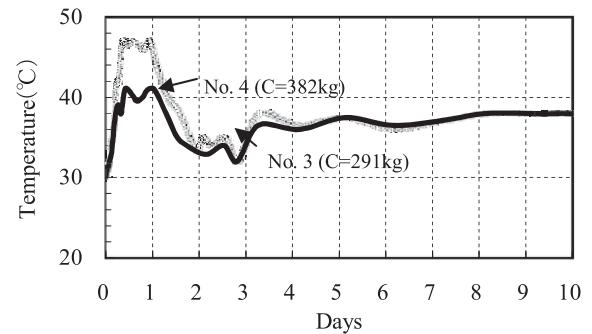
図一3 解析によるコンクリート供試体の内部温度と断熱温度上昇量

(4) 実験結果

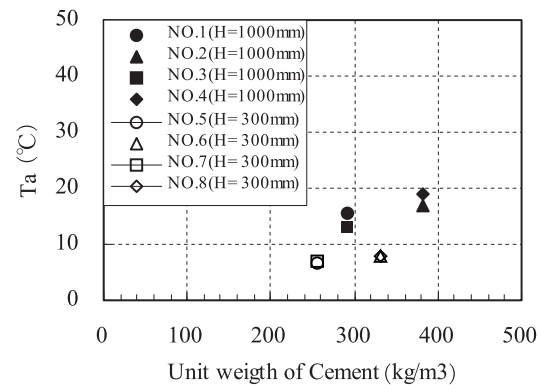
以下では、コンクリートの内部温度とひび割れ性状に着目して、代表的な結果について示す。

(a) コンクリート内部温度

材齢や単位セメント量に着目して、コンクリート内部温度を調べた。図一4は、 $H = 1000 \text{ mm}$ の部材における、材齢と内部温度の関係を示す。また、図一5は、単位セメント量と内部温度上昇量の関係を示す。



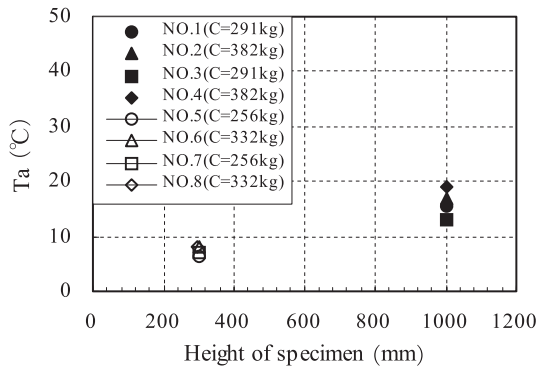
図一4 材齢と内部温度の関係 (H = 1000 mm)



図一5 単位セメント量と内部温度上昇量の関係

これらの図から、コンクリートの内部温度は、単位セメント量が多いほど高くなることが確認できる。また、図一6は、部材高さとの関係を示している。

コンクリート内部温度は、部材高さによっても変化することが確認できる。

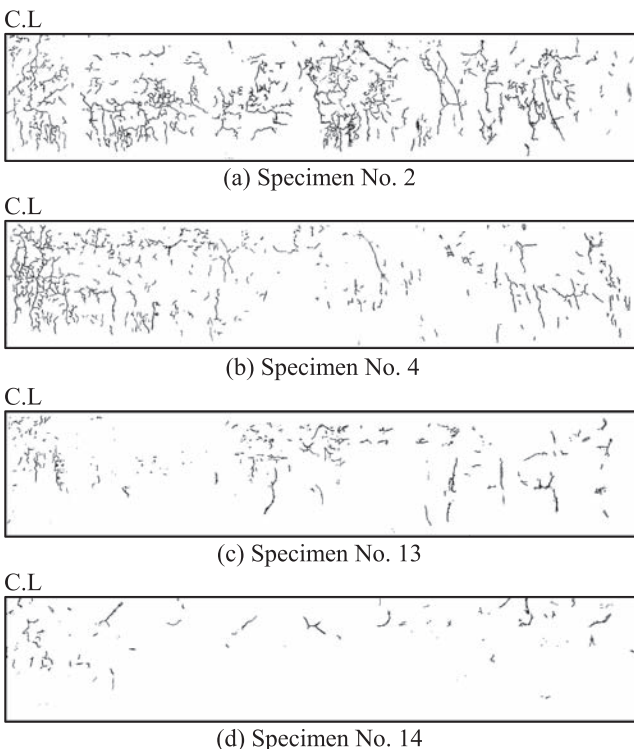


図一六 供試体高さとも内部温度上昇量の関係

(b) ひび割れ状態

ひび割れ性状については、無筋コンクリートか鉄筋コンクリートか、そして、養生システムの使用の有無で比較した。代表的なひび割れ状態を図一七に示す。(図は部材長さの半分を示している。) 最大のひび割れ幅は、0.3 mmであった。

図の中で、(a) と (b) は、養生なしで部材下部を拘束しており、ひび割れに対して条件の悪い状態に置かれている。また、(c) と (d) は、(a) と (b) の供試体と同じ試験条件で養生システムを用いた供試体の結果である。養生システムを用いることにより、ひび割れが抑制されている状況が確認できる。

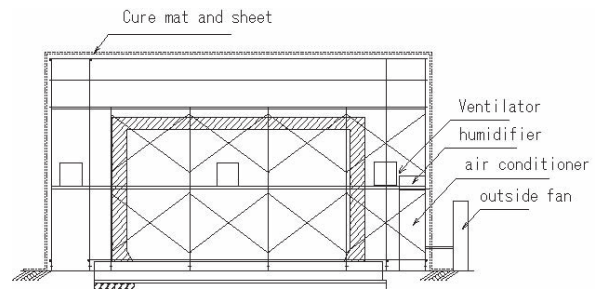


図一七 代表的なひび割れ性状

3. 養生システムの実構造物への適用

(1) 構造物の概要

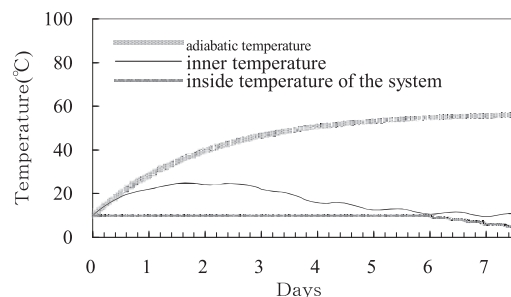
養生システムの実用性を確認するため、比較的等しい規模の2つの貯水槽で養生システムを使用した施工と通常の(冬季であるため)練炭とジェットヒーターでそれぞれ管理し、構造物の仕上がりを比較した。図一八は、養生システムを採用した貯水槽のコンクリート工事概要である。写真一三は、実際の工事の様子を示している(構造物全体を養生シートで覆っている)。貯水槽のサイズは、幅6.0 m、長さ11.5 m、高さ4.0 mで、壁厚は0.4 mである。養生システムとして使用したエアコンや加湿器は、先の実験で使用したものと同様である。施工時期は冬季で、山中の工事であったため、電源は発電器を使用した。エアコンの温度管理については、本構造物の場合、断熱温度上昇量の解析結果から、図一九に示すように設定した。



図一八 貯水槽の工事に養生システムを採用



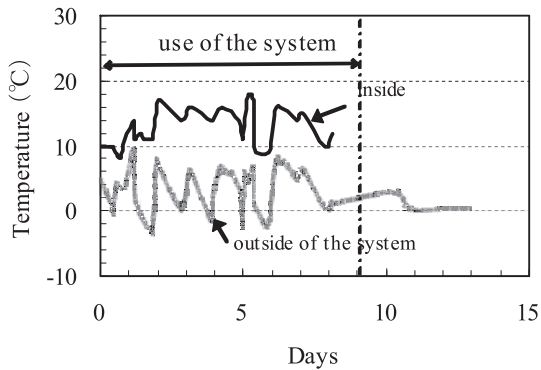
写真一三 養生システムの実用化



図一九 断熱温度上昇量からエアコンの設定温度を決定

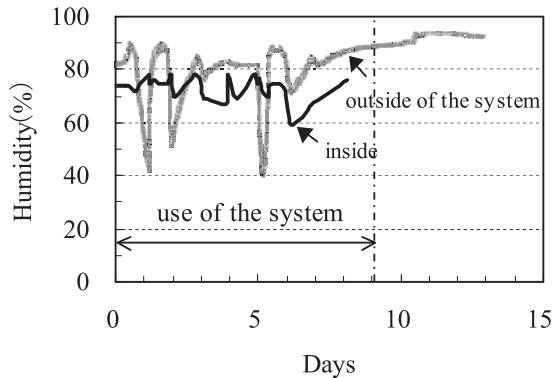
(2) 考察

図一10は、外気温とシステム内部温度の経時変化を示す。冬季であるため、外気温は夜間は0℃を下回ることもあった。内部の温度は外気温により影響を受けているが、ほぼ、システム内部は解析に近い15℃程度の温度となっている。



図一10 外気温とシステム内部温度の経時変化

図一11は、システム内部と外部の湿度の状態を示す。こちらも、冬季であるために、外部では40%まで湿度が低下することがあるが、内部ではほぼ70%を確保できた。



図一11 システム内部と外部の湿度の経時変化

この結果、練炭とジェットヒーターによる養生の場合は、脱枠段階で表面の荒さが認められたのに対して、養生システムを使用した貯水槽の仕上がりは、脱枠時には表面が鏡のように緻密な状態であることが確認された。

また、施工後3年経過した段階でそれぞれの構造物の状態を確認すると、練炭とジェットヒーターによる養生を行った貯水槽では、長さ2m程度の析出物を伴うひび割れの発生が確認された(写真一4)のに対して、養生システムを用いた貯水槽では、全くひび割れが確認されなかった。



写真一4 練炭とジェットヒーターによって養生された貯水槽でひび割れ調査

4. おわりに

建設現場で一定のコンクリートの品質を確保するための養生システムの開発のために、基礎実験を行い、この結果をもとに実構造物での適用を試みた。

基礎実験からは、コンクリートのセメント量や構造物の大きさとひび割れの関係が明らかになり、これらに対して、温度と湿度を制御する養生システムが効果的に機能することが確認できた。

養生システムの実際の構造物への適用を、貯水槽の工事で確認した結果からは、基礎実験と同様に、養生システム内の温度と湿度がコントロールされることで、構造物のひび割れが抑制され、品質の高い仕上がりが確認できた。その後、本システムは、国道バイパス工事の高架橋の高欄部分(写真一5～7)や擁壁工事でも成果を挙げている。



写真一5 養生システムを採用した国道バイパス上部工



写真一6 養生システムの設置状況



写真一七 完成した上部工（竣工時にひび割れは確認されていない）

しかしながら、養生システムは、養生シートの設置における施工手間や、シートで構造物全体を覆う必要があることから、大型のコンクリート構造物に対する気密性の確保や経済性は、今後の課題でもある。

一方で、コンクリートの養生を目的として開発した養生システムは、その養生空間内で（特に暑中や寒中に）作業する作業員のためにも快適な作業空間を提供するといった予定した効果以外のメリットも認められた。このことは3Kと言われ、厳しい環境にある建設現場で、工事関係者に快適な環境を与え、品質の良いコンクリート構造物をつくるといった未来の施工環境を考える一つのヒントになるとと思われる。

JCMA

《参考文献》

- 1) 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
- 2) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書設計編, 2007
- 3) 長田晴道, 小野定：温度解析方法に関する既往の研究成果について、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.39, 1982

【筆者紹介】



田村 隆弘（たむら たかひろ）
徳山工業高等専門学校
土木建築工学科
教授



坂本 修（さかもと おさむ）
洋林建設㈱
品質安全環境部
部長



上野 秀昭（うへの ひであき）
洋林建設㈱
土木部
工事長