

論文 熱映像を利用したプレキャストコンクリート製品の品質検査

柳内睦人*¹、魚本健人*²

要旨：本研究は、熱赤外線センサで得られる熱映像を利用してプレキャスト製品内部の配筋状態を非破壊で、かつ遠隔操作で離れた位置から検査することができる診断システムを構築することを目的としている。特に、この手法は工程ラインで製造されている蒸気養生後のプレキャスト製品の検査に用いる場合について検討を行い、かぶり厚が規格どおりであるか否かを判定するものである。その結果、熱映像から求めた温度特性曲線の定量値を利用することで短時間で鉄筋のかぶり厚を検査することができ、規格適合品であるか否かの品質検査が行えることを明らかにできた。

キーワード：熱映像、プレキャスト製品、温度特性曲線、内部判読、品質検査

1. はじめに

最近、熱赤外線センサによって得られる熱映像を利用して建築構造物の壁面の損傷や劣化、山腹斜面のモルタル吹付け面および橋梁床版のひび割れなどの診断が行われている。しかし、これまでの手法は、あくまでも表面あるいは極く薄い表面層を対象とした損傷診断で、熱映像内の相対的な温度差から損傷、欠陥の有無および位置などを識別するレベルであった。また、その測定法の結果は天候、気温および日射などの影響を受けるので、測定対象の周辺環境や測定時刻に制限が加わるのが普通である。したがって、これらの評価に当たっては、常に一律な基準で診断が行われることは期待できない。さらに、重要な点は、構造物の内部状態を定量的に診断するまでには至っていないという点である。

一方、プレキャスト製品は、機械設備はもとより使用材料の品質ならびに製造工程などを管理して製造されるために、等均質で所要強度を持っている。完成した製品の形状や仕上げ面などは、目視や簡単な計測で確認しているが、内部の鉄筋位置や所要の耐荷力などの評価はストックヤードに置いてある製品を規定のロットからランダムに抽出して載荷試験あるいは接触型の非破壊試験によって判定を行うため、検査結果が得られるまでに時間を要することになる [1]。しかし、いずれの検査法も、短時間に製品の品質を判定し、その結果を反映させて精度の向上を図ることが望まれている。

本研究は、上述の諸問題を改善することができる検査法として、製造工程における蒸気養生後の冷却過程時に得られる時系列の熱映像を利用する手法を提案するものである。特に、製品に接触することなく遠隔操作で得られる熱映像から算定した表面温度の経時変化曲線の定量値を指標としてプレキャスト製品の内部状態を検査するところに特徴がある。

2. 製品供試体および熱赤外線センサによる測定概要

観測の対象とした製品供試体は、配筋図どおりに配置された製品（規格製品と称する）とかぶり厚、鉄筋径および鉄筋数などが基準に適さない製品（欠陥供試体と称する）で、横390mm×縦

*1 日本大学 助教授 生産工学部土木工学科、工博（正会員）

*2 東京大学 教授 生産技術研究所、工博（正会員）

495mm×厚さ100mmの千葉県型側溝蓋
(製品品名 CHL 2-30)である [2]。

2.1 欠陥供試体の内部状態

欠陥供試体に対応する内部状態は、
次のように設定した(表-1 参照)。

- (1) かぶり厚に欠陥のある供試体
- (2) 鉄筋径に欠陥のある供試体
- (3) 鉄筋数に欠陥のある供試体

表-2 は、製品供試体の製作に使用
したコンクリートの配合表である。熱
赤外線センサによる製品供試体の表面
温度の測定は、コンクリート打設後の
製品供試体を蒸気養生室に入れ図-1
に示すような諸条件で養生を行った後
の冷却過程時を対象とした。

表-1 製品供試体の概要

内部 状態の相違	種別	製品 番号	鉄筋径 (mm)	かぶり厚 (mm)	鉄筋量 (cm ³)
かぶり厚		A-1	D10	10	411.9
		*A-2	D10	20	411.9
		A-3	D10	60	411.9
		A-4	D10	70	411.9
鉄筋量	鉄筋径	B-1	D6	20	182.9
		*B-2	D10	20	411.9
		B-3	D13	20	731.7
		B-4	D16	20	1146.9
	鉄筋数	C-1	縦筋 D10 6×横筋 D10 12本	20	494.3
		*C-2	縦筋 D10 5×横筋 D10 10本	20	411.9
		C-3	縦筋 D10 4×横筋 D10 7本	20	303.9
		C-4	縦筋 D10 3×横筋 D10 4本	20	195.8

* 規格製品

表-2 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	空気量 Air (%)	単 位 量 (kg/m ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)	
					水	セメント	細骨材	粗骨材	σ ₁₄	σ ₂₈
					W	C	S	G		
25	9±2.5	47	37.5	1.1	152	323	728	1204	335	400

時系列的な表面温度の測定は、
養生終了後(2分経過時)から距
離1.40mから1分間隔で20分間行っ
た。なお、測定面は、鉄筋の状態
を良く判読できるよう製品供試体
の引張側(製品供試体の裏側)で
ある裏面を対象とした。

2.2 表面温度の観測システム

従来の熱赤外線センサによる観
測では、収集した熱映像データを
パソコン本体内のハードデスクや

フロッピーデスクに保存するため取込みに長時間を要し、膨大な容量を必要としていた。しかし、本研究では、熱赤外線センサにビデオデッキを接続することにより熱映像データをリアルタイムに簡便に収集し、そのなかから必要な熱映像データのみを抽出して解析を行っている。特に、このシステムの利点は、観測がセンサ、モニターおよびビデオデッキのみで行うため観測機器の簡素化が図られ、広範囲の行動が可能となる。また、熱映像データを収集する場合は、ソフトウェアにパラメータを予めセットしておけば全て自動的に熱映像データを取込むことができる。

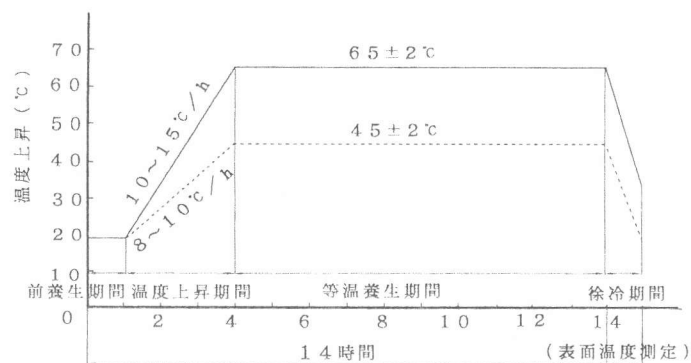
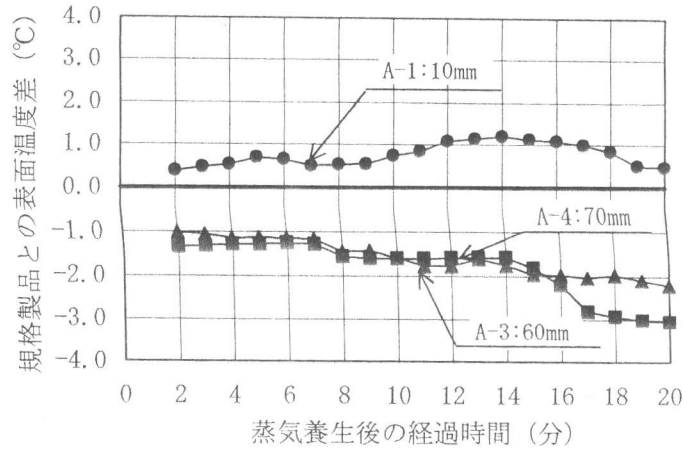


図-1 蒸気養生のサイクル

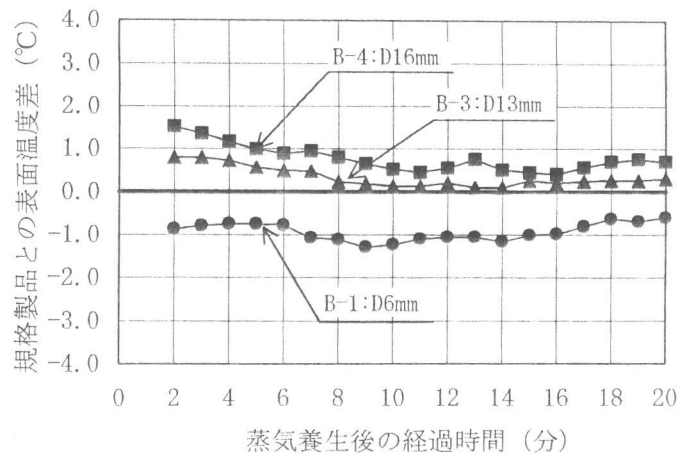
3. 熱映像から求めた温度特性曲線

所定の蒸気養生を行った後、2分経過時に熱赤外線センサで測定して得られた熱映像内には、規格製品および欠陥供試体内部の配筋状態に応じた温度分布パターンが現れないことが分かったので、熱映像の温度分布パターンから算定した両製品の表面平均温度差から表面温度特性の違いを比較することにした。すなわち、鉄筋径および配筋状態の違いは、内部にある鉄筋量の違いに換算して、熱映像に現れている製品面全体の平均温度の違いでその製品供試体を診断することにした。診断に利用する温度特性曲線は、規格製品の熱映像が示す平均温度を基準として、欠陥供試体の熱映像が示す平均温度差の時間変化曲線で表した [3]。なお、平均温度の測定範囲は、製品の水切り部を除いた縦465mm×横390mm(縦215画素×横202画素)の部分である。

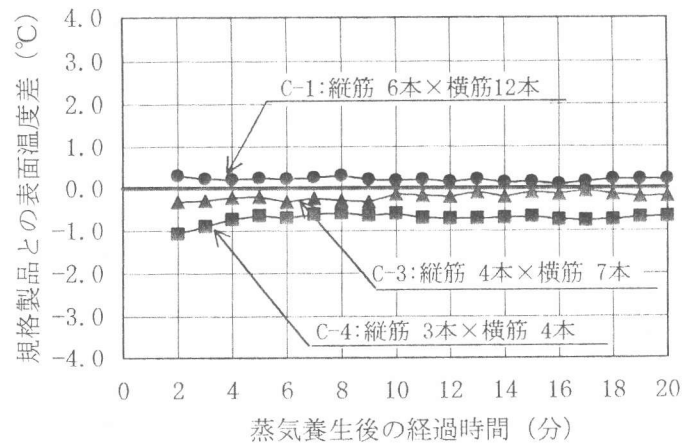
図-2(1)～図-2(3)は、養生温度が65℃の場合の規格製品に対するかぶり厚、鉄筋径および鉄筋数の異なる欠陥供試体の温度特性曲線である。規格よりかぶり厚の小さい供試体はプラス側に、かぶり厚の大きい供試体はマイナス側にある温度特性曲線となった。これは、鉄筋が浅い位置にあるほど鉄筋内に貯留した熱が冷却時に多く放熱されるためである。また、かぶり厚が大きくなるほど上部のコンクリートが鉄筋の保温材の役割を果たして表面温度の差異が発生したものと考えられる。同様に、鉄筋径に欠陥がある供試体では規格より太い径の鉄筋が入った供試体はプラス側に、細い径の鉄筋が入った供試体はマイナス側にある温度特性曲線となった。これは、鉄筋径が大きいほど内部の鉄筋量が多く熱容量が大



(1) かぶり厚の異なる欠陥供試体



(2) 鉄筋径の異なる欠陥供試体



(3) 鉄筋数が異なる欠陥供試体

図-2 欠陥供試体の温度特性曲線 (65℃養生時)

きいため、冷却時の放熱温度が高くなるためである。また、鉄筋数に欠陥がある供試体では規格より鉄筋数の多い供試体はプラス側に、鉄筋数の少ない供試体はマイナス側にある温度特性曲線となった。これは、鉄筋径の違いと同様、内部の鉄筋量の違いによる冷却時の放熱温度が高くなるためである。

3.1 養生条件の相違による温度特性への影響

プレキャスト製品に使用する鉄筋は、コンクリートの製造工程とは別に組立工程を設けて製作するため、使用する鉄筋の径や数の間違いの発生はほとんど考えられないが、コンクリートの打設や振動締め固めによって鉄筋がずれて所定のかぶり厚を保持することができない場合がある。また、プレキャスト製品の蒸気養生は、製造する製品や工場によって独自の養生条件を設けて実施しているが、本項では、2通りの蒸気養生を行い検討を加えることにした。すなわち、養生条件は、等温養生を温度 $65 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $45 \pm 2^\circ\text{C}$ および湿度 $90 \pm 3\%$ として、養生後の冷却過程時の表面温度の測定を行い比較検討を行った。

図-3は、蒸気養生が温度 $45 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $90 \pm 3\%$ で10時間の等温養生を行ったかぶり厚の異った欠陥供試体の温度特性曲線である。規格製品よりかぶり厚の小さい欠陥供試体はプラス側を、かぶり厚の大きい欠陥供試体はマイナス側を推移する温度特性曲線であり、この現象は、蒸気養生条件が異なっても定性的には同様であるという結果が得られることが分かった。

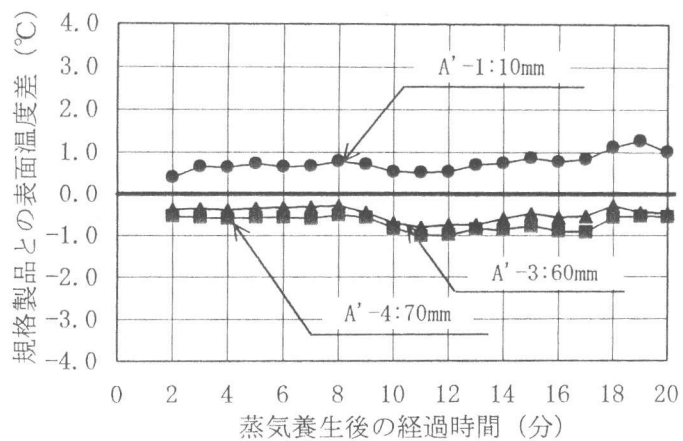


図-3 かぶり厚の異なる欠陥供試体の温度特性曲線（ 45°C 養生時）

4. 定量化した温度特性曲線による欠陥供試体の判別

これまでの実験で各欠陥供試体の温度特性曲線は、その欠陥状況に対応して異なることが確認された。この実験結果を欠陥供試体の判別に応用する場合、温度特性曲線の線形の違いによる判別では定性的であり、実用的な判別法として利用し難いので、その線形を定量化して判別することにした。すなわち、温度特性曲線の定量化は、温度特性曲線において、経時変化がほぼ一樣な蒸気養生終了後3分~7分間の温度差の平均値で代表させた。

表-3は、かぶり厚ならびに鉄筋量（鉄筋径および鉄筋数から算定した全体積）の欠陥内容と温度特性曲線の定量値を示した。

図-4は、鉄筋量が等しく作られた供試体

表-3 温度特性曲線の定量値

内部状態の相違	種別	製品番号	温度特性曲線の定量値(°C)
かぶり厚	養生温度 ($65 \pm 2^\circ\text{C}$)	A-1	0.62
		* A-2	0.00
		A-3	-1.13
		A-4	-1.28
	養生温度 ($45 \pm 2^\circ\text{C}$)	A'-1	0.60
		* A'-2	0.00
		A'-3	-0.35
		A'-4	-0.58
鉄筋量	鉄筋径	B-1	0.70
		* B-2	0.00
		B-3	-0.61
		B-4	-1.07
	鉄筋数	C-1	0.22
		* C-2	0.00
		C-3	-0.25
		C-4	-0.72

* 規格製品

の養生温度が異なる場合のかぶり厚と温度特性曲線の定量値との関係、図-5は、かぶり厚が等しく作られた供試体の鉄筋量と温度特性曲線の定量値との関係を示した。両図には、相関関係が認められ、製品のかぶり厚、鉄筋径および鉄筋数などが温度特性曲線の定量値によって識別できることが分かった。

5. 温度特性曲線を指標とした かぶり厚の品質検査

製品内のかぶり厚、鉄筋径および配筋数などの違いが、温度特性曲線の定量値で診断できることが実験で確認できたので、これをプレキャスト製品で最も多発すると思われるかぶり厚の欠陥品に関する品質検査に応用することにした。

JIS A 5305に規定されている規格製品に対する許容曲げ強さは、中央集中荷重によって初めてひび割れが現れる荷重である。本研究で対象とした製品においては、かぶり厚20mmの本規格製品に対するひび割れ発生時の曲げ強度は2,900kgfとなっている。これに対して、かぶり厚10mm、30mmおよび40mm製品の同荷重強度における引張縁ひずみは、規格製品の引張縁ひずみのそれぞれ81%、127%および197%であることが曲げ強度試験で確かめられ、製品の品質に鉄筋のかぶり厚が大きく関与していることが分かった。

図-6は、数値解析によって求めた許容曲げ強度2,900kgfの載荷時における製品のかぶり厚と引張縁ひずみとの関係を示した。本図から、かぶり厚の変化に対する引張縁ひずみの変化の関係がほぼ一価関係を示す

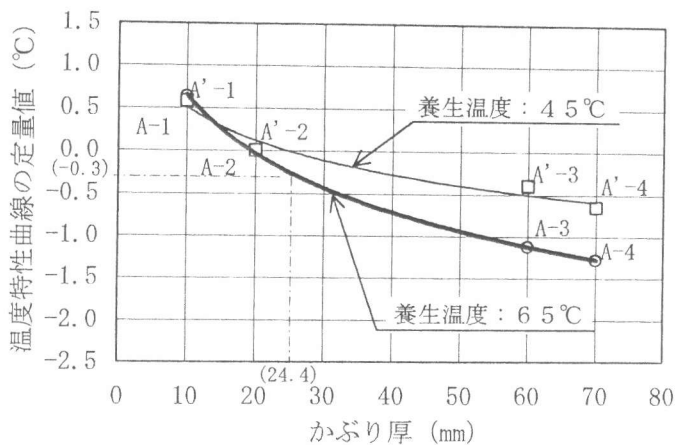


図-4 温度特性曲線の定量値と
かぶり厚との関係

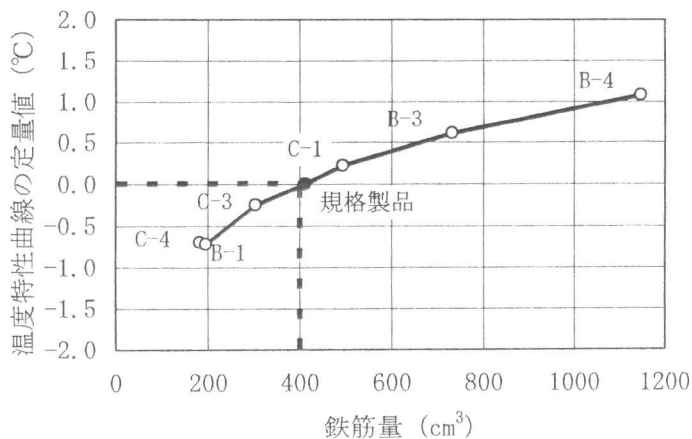


図-5 温度特性曲線の定量値と
鉄筋量との関係

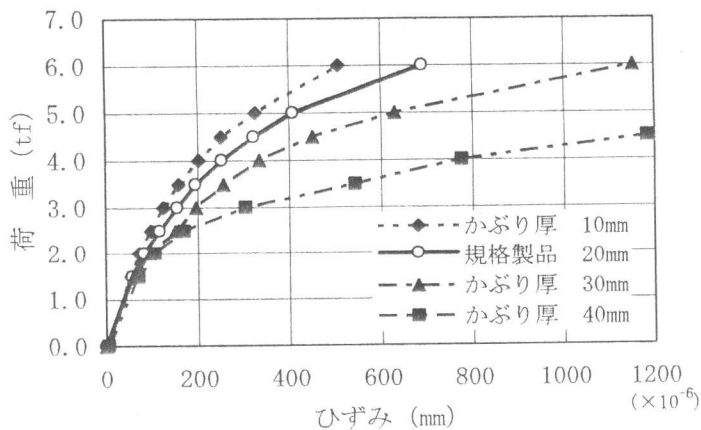


図-6 かぶり厚の相違による曲げ荷重と
引張縁ひずみとの関係

ことが分かった。なお、数値解析は、対象とする製品の形状および荷重状態からこれを棒状部材とみなし、断面力の算定が最も簡便な断面切断法を用いることにした。特に、算定精度が高さ方向の分割数に依存するため、分割要素は全断面を水平に1.0mmの等間隔で、100等分して算定した。曲げ荷重の荷重時における引張縁ひずみとひび割れとの関係には、純引張における破壊開始点ひずみにおいて発生するひび割れが約 $130\mu\text{m}$ であるという吉本氏の研究がある[4]。本研究では、これを製品のひび割れに対する品質検査に適用し、許容曲げ荷重の荷重時において製品にひび割れが発生するかぶり厚の境界値として、引張縁ひずみ $130\mu\text{m}$ 時におけるかぶり厚が24.4mmであることを図-7から読み取った。

さらに、この結果を養生温度 65°C の温度特性曲線の定量値と製品のかぶり厚との関係を示した図-4にあてはめ、かぶり厚が24.4mmの製品が示す温度特性曲線の定量値 -0.3°C を読み取った。したがって、この値より負温度の大きい製品はかぶり厚に対しては規格外であると判定することができ、本研究では、この手法をかぶり厚に関する品質検査法とした。

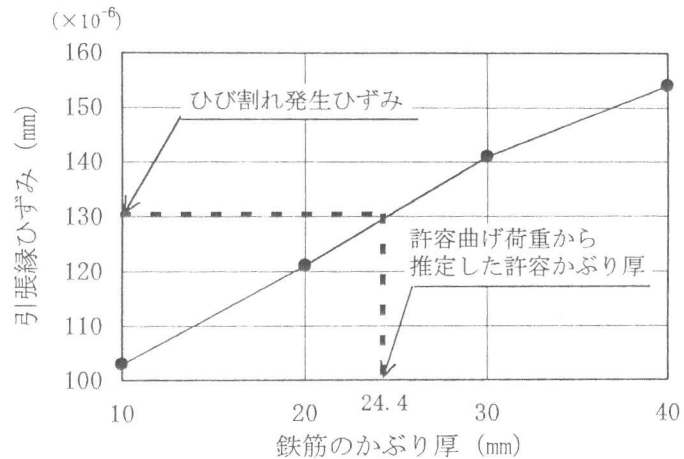


図-7 許容曲げ荷重に対するかぶり厚と引張縁ひずみとの関係

以上に提案した温度特性曲線を指標とした鉄筋のかぶり厚の品質検査法を利用すればプレキャスト製品の工場で

最も発生しやすい製品の裏表を間違えた鉄筋の挿入（本研究で対象とした製品の場合には規格製品のかぶり厚20mm挿入に対するかぶり厚60mmに対する検査）は、図-7および図-4を利用して温度特性値の定量値 -1.2°C が得られ、規格製品が示す温度特性曲線の定量値と容易に識別することができる。

6. まとめ

プレキャスト製品を対象にして、本研究で提案している温度特性曲線を指標とした内部診断法を製造工程での品質検査に適用した結果、製品内部の鉄筋のかぶり厚に対する品質検査ばかりでなく、製品のひび割れ発生ひずみによる強度管理に発展させることが可能であることを示した。また、時系列の熱映像を利用することにより製造工程ラインを停止せずに短時間で低コストで検査することができる品質検査システムを提案することができた。

参考文献

- 1) 魚本健人、加藤 潔、広野 進：コンクリート構造物の非破壊検査，pp. 6~11, 森北出版(株)
- 2) 柳内睦人、魚本健人：熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究，土木学会論文集 No. 442/V-16, pp. 91~100, (社)土木学会, 1992. 2
- 3) 千葉県コンクリート製品工業組合編：千葉県型側溝蓋の規格制定書，p20, 1989. 10
- 4) 吉本 彰：コンクリートの変形と破壊，pp. 146~151, (株)学献社, 1990.