

# 部材内部に温度勾配を生じるコンクリート部材の内部水分—微細構造変化

Internal Moisture and Microstructural Changes in Concrete Members with Temperature Gradient

東京都市大学 准教授 佐藤幸恵

## (研究計画ないし研究手法の概略)

コンクリート構造物の長期強度の発現は、耐震安全性をはじめとしたさまざまな性能に対するコンクリート構造物の実力評価ならびに将来予測の上で基礎情報となる。構造物の保全を考える場合には現状が要求機能を果たすだけでなく、想定される供用期間の範囲で機能が満たされることを評価しなくてはならない。また、今後は、実力によっては構造物の供用期間を延ばして利用する重要構造物も増えると考えられる。このような実力評価を行うためには、コンクリート部材の物性変化を生涯にわたり予測する必要がある。しかし、コンクリート部材の生涯物性変化は初期の水和反応が活発な時期の養生に多く依存しているが、そのメカニズムは明らかにされておらず、定量的予測ができない状況にある。

本研究では、これらのコンクリート工学領域の背景をもとに、特にセメントペーストの水和物の生成と強度発現が、履歴温度によってどのように変化するかについて明らかにすることを目的として、構造物を模擬した温度勾配を部材内部に生じさせたセメントペースト模擬供試体の水和反応、微細構造の実態を実験的に検討するものである。

本研究では、セメントペースト供試体を  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  環境で養生し、所定の材齢後から  $60^\circ\text{C}$  および  $90^\circ\text{C}$  で加熱を行い、加熱経過時間ごとに供試体を切り出し、圧縮試験、ビッカース試験を行うものである。その際に、ビッカース試験での試験点（打痕）が水和物中のどの水和物を対象としたものであるか確認するために電界放射型走査型電子顕微鏡（FE-SEM）およびを用いて打痕位置を確認し分類する。同時に、粉末 X 線回折（XRD）/リートベルト解析を用いて、使用したセメントの鉱物組成および生成した水和物量を分析した。セメントは早強ポルトランドセメント（密度  $3.14\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積  $4230\text{g}/\text{cm}^2$ ）を

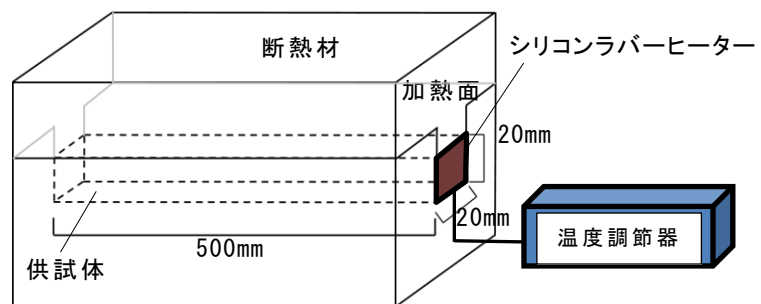


図1 加熱装置概要

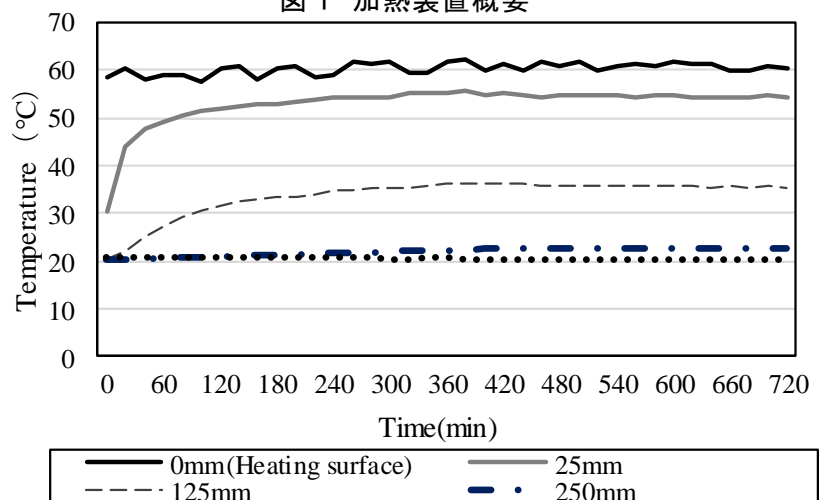


図2 加熱結果 ( $60^\circ\text{C}$ )

使用し、練り混ぜ水は上水道水を用いた。水セメント比は 0.5 とし、セメントペーストの練り混ぜにはホバートミキサーを使用した。このとき、練り混ぜ温度が  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  となるように練り混ぜ水の温度を約  $10^\circ\text{C}$  に調整した。ミキサーで 3 分間練り混ぜ、練り混ぜ後は、ブリーディング水が減少するまで  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の室内で 30 分おきに練り置きを行った。約 3 時間経過後に練り置きを終了とし、セメントペーストを内寸  $20 \times 20 \times 500\text{mm}$  の型枠容器に流し込み、所定の材齢まで  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  環境下で封かん養生を行った。

**(実験調査によって得られた新しい知見)**

図 3 に  $20^\circ\text{C}$  封かん養生を行った圧縮強度試験の結果を示す。強度試験結果は、1 供試体から 5 個切り出した平均を用いた。また、図 4 に、材齢 7 日まで  $20^\circ\text{C}$  封かん養生後、 $60^\circ\text{C}$  加熱をした場合と、材齢 28 日まで封かん養生後、14 日間  $60^\circ\text{C}$  および  $90^\circ\text{C}$  加熱をした場合の圧縮強度試験結果を示す。材齢 7 日から加熱した場合は加熱面から近いほど加熱後の強度増進は小さく、加熱面から離れるほど強度増進は大きい傾向がみられ、加熱により強度増進が阻害されていることを確認した。一方、材齢 28 日から加熱した場合は、 $60^\circ\text{C}$  加熱の場合には加熱面から離れているほど強度が低い傾向があった。 $90^\circ\text{C}$  加熱の場合では、全体的に強度が低い傾向があった。

図 5 に FE-SEM で取得した反射電子像を示す。画像中のダイヤモンド圧子による圧痕および圧痕位置を赤丸で記している。これを、反射電子像における平均原子番号による輝度分布を利用し、未水和セメント (UHC)、水酸化カルシウム (CH)、カルシウムシリケート水和物 (C-S-H) に分類した。

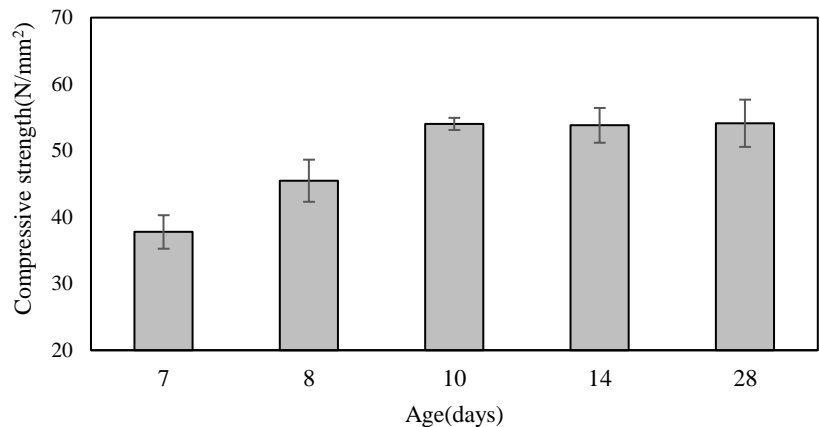
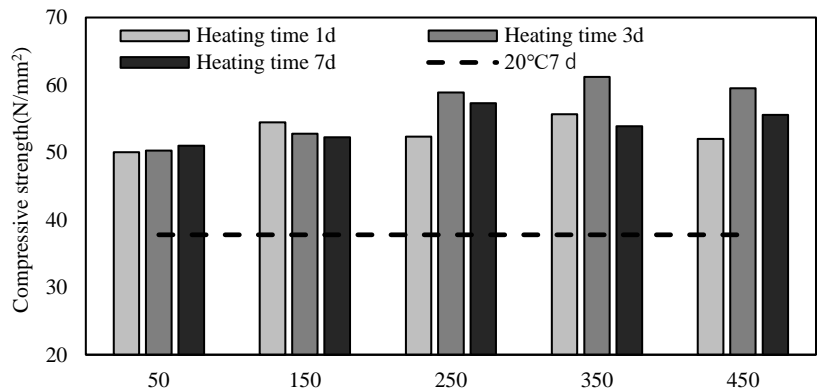


図 3 圧縮試験結果 ( $20^\circ\text{C}$  封かん)

(a) 材齢 7 日まで封かん養生後  $60^\circ\text{C}$  加熱



(b) 材齢 28 日まで封かん養生後 14 日間  $60^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  加熱

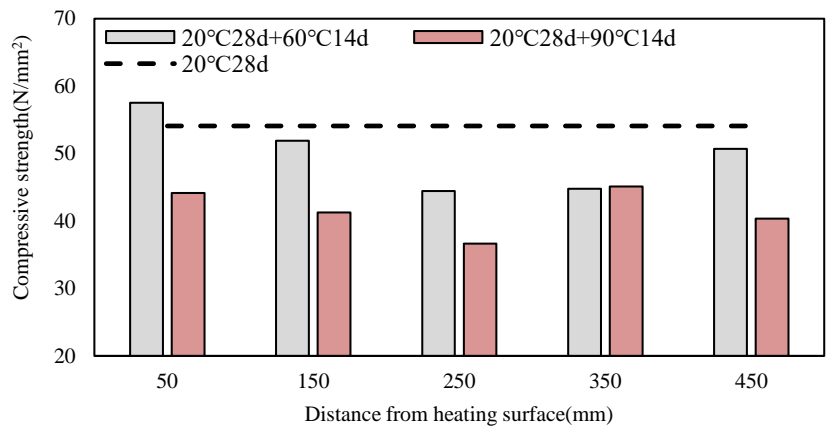


図 5 圧縮試験結果 (加熱養生)

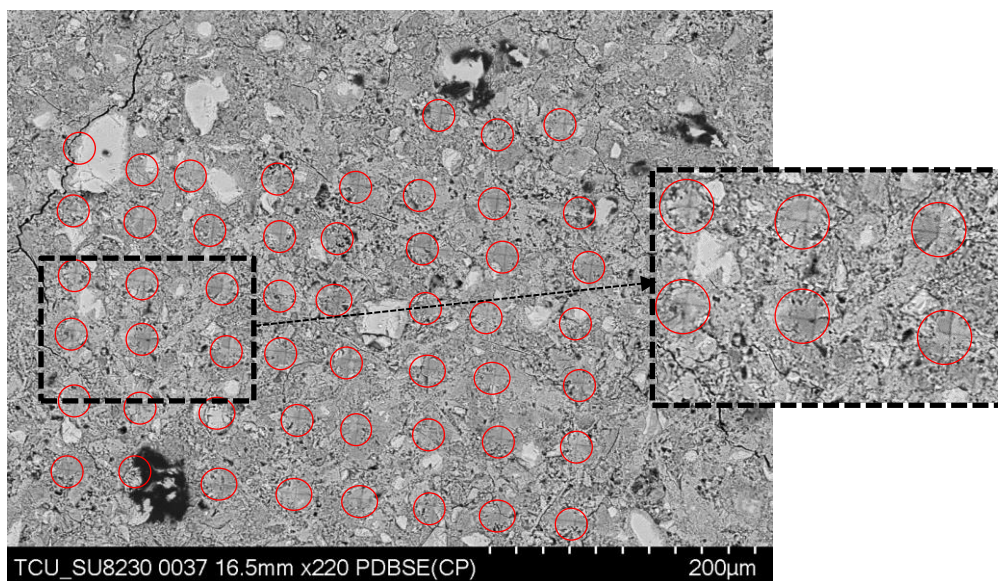


図 5 圧縮試験結果 (20°C封かん)

図 6 にビッカース試験の結果を示す。図 6 は水和物を識別しない状態での結果である。これに、対応する材齢の圧縮強度試験結果も示した。図より、圧縮強度とビッカース硬さの数値は異なる性質を表す値ながらほぼ近い数値となった。一方、ビッカース硬さはばらつきが大きく、材齢が経過するとばらつきは小さくなる傾向があった。これは、初期材齢ほど未水和セメントが多く、クリンカーの強度が大きくばらつくためと考えられる。電子顕微鏡画像をもとに水和物と未水和物を分類した結果を図 7 に示す。

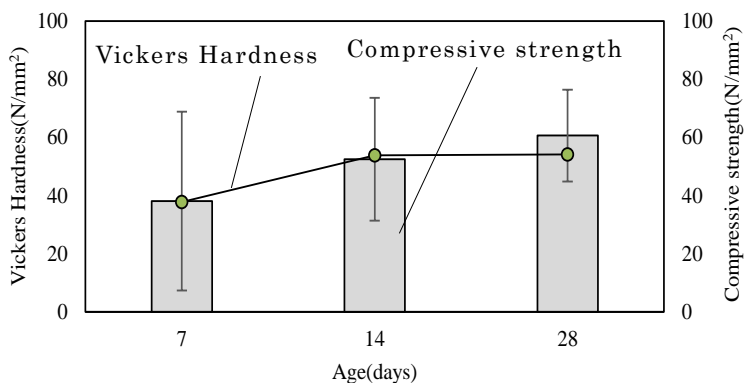


図 6 ビッカース硬さおよび圧縮試験結果 (20°C養生)

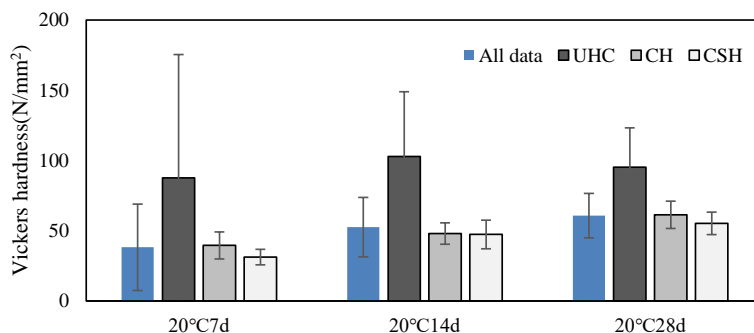


図 7 水和物ごとのビッカース硬さ試験結果 (20°C養生)

図 7 より、UHC は強度が高いが、大きくばらついた。これは、未水和物の鉱物により強度が異なるためと考えられる。一方、20°C養生においては、CH および C-S-H は近い値となったが、やや CH のビッカース硬さが高い傾向がみられた。なお、空隙や亀裂点を試験した場合は Error として除外しているが、それぞれの構成割合によっても強度を構成する硬化体の寄与度は異なるものと考えられる。

また、図 8 に加熱養生を行った供試体のビッカース硬さと圧縮強度の比較結果を示す。ビッカース硬さは CH と C-S-H とし、加熱面からの距離ごとに表した。図より、それぞれの水和物のビッカース硬さと圧縮強度は同様の傾向を示した。ばらつきはあるが、CH の方がビッ

カーズ硬さは大きく、かつ、加熱条件に関わらず、全体として C-S-H よりも CH のビッカース硬さと圧縮強度が類似した値となった。しかし、加熱面に最も近い位置では、C-S-H の値に近くなる傾向がみられた。高温加熱時には水和物の生成比率が異なり、生成量がこれらの結果に影響を及ぼしている可能性が考えられる。加熱開始材齢の違いについては、材齢 7 日で加熱を開始した場合には、加熱面から離れた位置のほうがビッカース硬さは大きい傾向があり、材齢 28 日から加熱を開始した場合には、加熱面に近いほうが加熱温度 60°C、90°C のいずれの場合でもビッカース硬さは大きくなる傾向があった。これを、XRD/リートベルト解析によって得られた加熱時の水和物生成量と比較すると、図 9 に示すように、加熱供試体では、20°C 養生と比較し、C-S-H の生成量が増加する傾向があり、CH は加熱による変化は小さかった。従って、加熱面に最も近い位置では、強度の低い C-S-H が多く生成したため、強度の停滞がみられたと考えられる。本研究の結果より、セメント硬化体の強度発現には、水和物の強度とその生成比率の変化が相互的に影響していることを実験的に明らかにし、加熱時に生じる C-S-H の生成増進が強度増進の停滞の要因の一つであることを示した。今後、さらに継続した長期的な変化を計測することで、長期的な性能保持性を評価出来ると考えられる。

**( 発 表 論 文 )**

日本建築学会論文集に投稿準備中

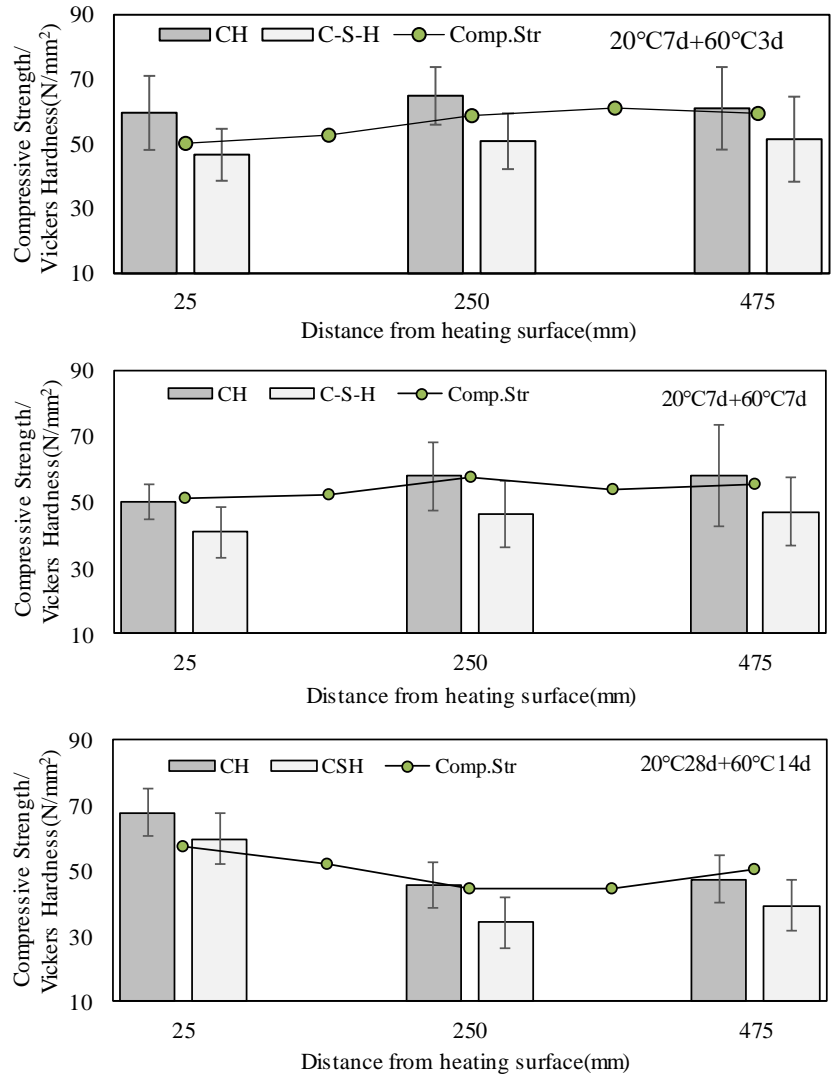


図 8 水和物ごとのビッカース硬さ試験結果 (加熱養生)

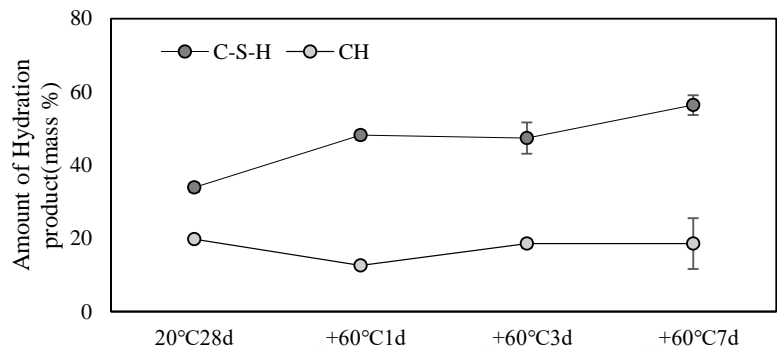


図 9 XRD/リートベルト解析による水和物生成量 (加熱部)