

高温加熱を受けたコンクリートの再養生による性能変化と回復に関する研究 —質量、長さ、動弾性係数および超音波伝播速度について

李柱国^{*1} 流田靖博^{*2} 杉原大祐^{*2}

*1 山口大学 大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

*2 一般財団法人建材試験センター 西日本試験所(〒757-0004 山口県山陽小野田市大字山川)

要旨：本研究ではコンクリートの加熱後の質量(M)、長さ(L)、動弾性係数(E_d)および超音波伝播速度(V_u)の変化を実験的に考察し、加熱温度、加熱前の強度、冷却方法、再養生方法と期間がこれらの性能変化に及ぼす影響を検討した。結果として、1)加熱後の水中再養生によって供試体の M、L、 E_d および V_u は、加熱直後より大幅に増加するが、空气中再養生の場合、これらの増加は僅かである。2)再養生によるこれらの性能変化は、水中再養生の場合には最初の 1 ヶ月に、空气中再養生の場合には最初の 1 週間に主に発生する。3)加熱温度または加熱前の強度が高いほど M、 E_d および V_u の低下率は大きい、水中再養生による増加は多い。しかし、長さ増加は高強度コンクリートの方が少ない。4) 空気冷却に比べ、水急冷却は E_d と V_u を大幅に低下するが、空气中再養生の場合の性能回復に大きな影響を与えない。

キーワード：コンクリート、火害、性能回復、質量、体積、動弾性係数、超音波速度、再養生

1. はじめに

日本での火災の出火件数は年間 5 万件程度である。そのうち、建物火災が全火災の約 55 % で最も高い比率を占めている¹⁾。一方、土木コンクリート構造物の火災については、交通量や輸送量の増加により道路トンネルの事故件数が増加の傾向を示し、最近では毎年 20~30 件程度の頻度で発生している²⁾。

コンクリートは火害を受けると、成分変質と膨張・収縮によって内部組織が破壊され、強度および弾性係数などの力学性能が低下する³⁾。また、水酸化カルシウムが高温で分解すると、コンクリートのアルカリ性が失われる。なお、受熱によってコンクリートの表面にひび割れが多発する。コンクリートの物質侵入抵抗性が低下し、炭酸ガス、酸素および水などが拡散しやすくなる^{4, 5)}。したがって、加熱されたコンクリートの中性化抵抗性が低下し、鉄筋コンクリート構造物の耐久性が損なわれる。

日本建築学会「建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説」⁶⁾は、① 受熱温度が 500 °C を超えた箇所のコンクリート、② 受熱温度が 500 °C 以下であるが、コア強度が設計基準強度以下であるコンクリート、③ ひび割れの幅が数 mm のコンクリートをはつりとして打ち直すと規定している。コンクリートの打ち直しは手間と時間がかかる。一方、受熱したコンクリートは、分解した C-S-H ゲルの再水和反応によって、その性能が時間とともにある程度まで回復できる⁷⁻⁹⁾。このため、火災後の性能診断の結果は診断時期の影響を受けると考えられる。また、李らはケイ酸系化合物を主成分とした

コンクリート改質剤の塗布や含浸は加熱後の力学性能と中性化抵抗性の回復を促進できると指摘している¹⁰⁾。したがって、火害を受けたコンクリートの自己修復能力を生かした補修・補強は必要かつ可能である。

現在、受熱したコンクリートの性能回復は注目されているが、国内外の調査研究の殆どは圧縮強度と細孔の変化に関するもの^{5, 11-13)}で、圧縮強度以外の性能回復に関する研究¹⁴⁾があるものの、すべての性能の回復挙動と影響要因は明らかになっていない。

火害を受けたコンクリートの性能回復挙動を解明するための一連の研究として、本研究では、受熱したコンクリートの質量、長さ、動弾性係数および超音波伝播速度の変化と加熱前の強度レベル、加熱温度、冷却方法、再養生方法・期間の影響を考察する。

2. 実験概要

2.1 試験体の作製

普通ポルトランドセメント、碎石、海砂および AE 減水剤または高性能 AE 減水剤を使用した。用いた材料の性質とコンクリートの調合をそれぞれ Table 1 と Table 2 に示す。

水セメント比が 60 % と 38 % のコンクリートを強制練りミキサで練り混ぜた直後にスランプと空気量を測定し、 $\phi 10 \times h 20 \text{cm}$ の圧縮試験体を作製した。スランプ、空気量および材齢 28 日の圧縮強度を Table 2 に併示する。

2 シリーズのコンクリートの空気量は 6.0 % より 0.5 や 2.0 % 多いが、同一のコンクリートに対する受熱前後の性

Table 1 Properties of used raw materials

Raw materials	Symbol	Type	Property
Cement	C	Ordinary portland cement	$\rho = 3.16$, SSA = 3,300
Coarse aggregate	G	Crushed siliceous stone	$\rho_s = 2.73$, $w_b = 0.47$, $s_c = 59.2$, F.M. = 6.68, $D_{max} = 20$
Fine aggregate	S	Sea sand	$\rho_s = 2.57$, $w_b = 1.36$, $s_c = 66.7$, F.M. = 2.90
Admixture	WR	AE water reducer	Lignosulfonate salt
	HRWR	High-range AE water reducer	Polycarboxylic acid-based polymer

[Notes] ρ : Density (g/cm^3), SSA : Specific surface area (cm^2/g),
 ρ_s : Density in saturated surface-dry state (g/cm^3),
 w_b : Percentage of water absorption (%), s_c : Solid content (%), F.M. : Fineness modulus, and D_{max} : Maximum size of coarse aggregate.

能比較に支障をきたさない。また、受熱後に熱分解によって空隙量が大幅に増加するため、この程度の空気量増加は、第3章に述べる再養生による性能変化の傾向を変えないと考えられる。また、No.1の圧縮強度は38.1MPaで、No.2は54.3MPaであった。JIS A 5308 : 2014に規定されるコンクリートの種類と照合すると、No.1を普通コンクリート、No.2を高強度コンクリートに区別してもよい。

また、圧縮試験体と共に、 $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ の角柱試験体を調合別に15本を作製した。24時間後に試験体を脱型して、材齢28日まで温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。

2.2 試験体の加熱と再養生

試験体の加熱は電気炉を用いた。加熱の目標温度は 300°C 、 400°C および 500°C の3水準とした。炉内温度が目標温度に達する加熱時間を1時間とし、昇温速度は $5.0 \sim 8.3^\circ\text{C}/\text{分}$ であった。また、炉内温度が目標温度になった後に2.5時間維持した。予備実験の結果によって、試験体中心の目標温度は、目標温度の高低によって異なったが、2.0~2.5時間維持された。3つの温度水準にこの程度の昇温速度と高温維持時間の差異はあっても、コンクリートの劣化程度への影響は殆どないと考えられる^{15,16)}。

冷却と再養生方法のパターンは3つあり、それぞれ① A→W : 空気中自然冷却→28日間水中再養生→空気中再養生 ($20 \pm 3^\circ\text{C}$, R.H.60%)、② W→A : 水冷却→空気中再養生および③ A→A : 空気中自然冷却→空気中再養生であった。

空気中自然冷却の場合、加熱終了後に供試体を炉内に置いたままで加熱炉の蓋を開けて冷却させた。一方、水冷却の場合、加熱終了後に供試体を加熱炉から取り出して約10リットルの水をかけて冷却させた。再養生開始まで供試体を $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の部屋に放置した。

水中再養生は加熱が終了してから14~18時間後に行い、その直前に0時間再養生材齢の性能を測定した。一方、空気中再養生の場合、再養生は加熱が終了した後常温(約4時間後)になってからであり、加熱後の最初の性能試験は、10~14時間の再養生材齢に行った。

Table 2 Mix proportions and properties of concrete

No.	W/C (%)	s/a (%)	Unit mass (kg/m^3)				Admixture (C×%)	Sl (cm)	A (%)	F_c (MPa)
			W	C	S	G				
1	60	47	179	298	825	980	WR, 0.5	15.0	6.5	38.1
2	38	41	165	434	688	1,048	HRWR, 1.0	21.0	8.0	54.3

[Notes] W/C : Water-cement ratio, s/a : Sand-aggregate ratio by volume, Sl : Slump, A : Air content (%), and F_c : Compressive strength

2.3 測定項目と方法

加熱前(BH)、加熱直後(0時間または10~14時間の再養生材齢)および1、2、3、4、8、12週間の再養生材齢に、各角柱試験体の気乾($20 \pm 3^\circ\text{C}$, R.H.60%)または表乾質量、縦方向の共鳴振動数および超音波速度を測定し、またJIS A 1129-1 : 2010に準じてコンパレータ法によって長さ変化の測定も行った。

測定した供試体の質量は、水中再養生期間に表乾質量であったが、空气中再養生期間に気乾質量となった。加熱直後の質量の測定は、冷却後に $20 \pm 3^\circ\text{C}$, R.H.60%の室内に1日保管してから行った。また、超音波速度の測定は、角柱試験体の打設面以外の3面においてセンサー中心の間隔が100mmで行い、3面の平均値を超音波速度とした。各再養生材齢の測定位置は同じであった。

3. 実験結果および考察

3.1 質量変化

Fig.1とFig.2にそれぞれシリーズNo.1とNo.2の加熱後と加熱前の質量比を示す。これらの図に示すように、加熱によって各試験体の質量は3.5~5.0%減少した。加熱温度が高いほど減少率は大きいことが認められた。500°C加熱の場合、2つのシリーズのコンクリートの加熱直後の質量減少率はほぼ同じであったが、300°Cと400°C加熱の場合にはNo.2の方が小さかった。

冷却・再養生パターンW→AとA→Aの試験体の質量は加熱後に緩やかに増加していく傾向が見られた。12週の質量比は96%以上であり、加熱温度が高いほど大きい傾向が見られた。これは再養生によって水和反応生成物が生じたためであると考えられる。質量増加速度は加熱前の強度と受熱温度にも拘らずほぼ同じであった。

一方、パターンA→Wの試験体の質量は最初に100%以上増加し、空气中再養生の期間に入ると質量は減少していく傾向が見られた。最初の急増加は吸水のためである。また、空气中再養生の期間に質量は低下し、ある安定値に近づいたのは気中乾燥のためである。12週の質量残存率は加熱温度と加熱前の強度によらず99%以上であり、パターンW→AとA→Aより大きかった。受熱温度が同じの試験体の気中平衡含水率は同じであると考えれば、水中再養生の試験体の質量回復は空气中再養生より大きいことが分かった。

また、パターンA→Wの試験体の12週の質量比は、

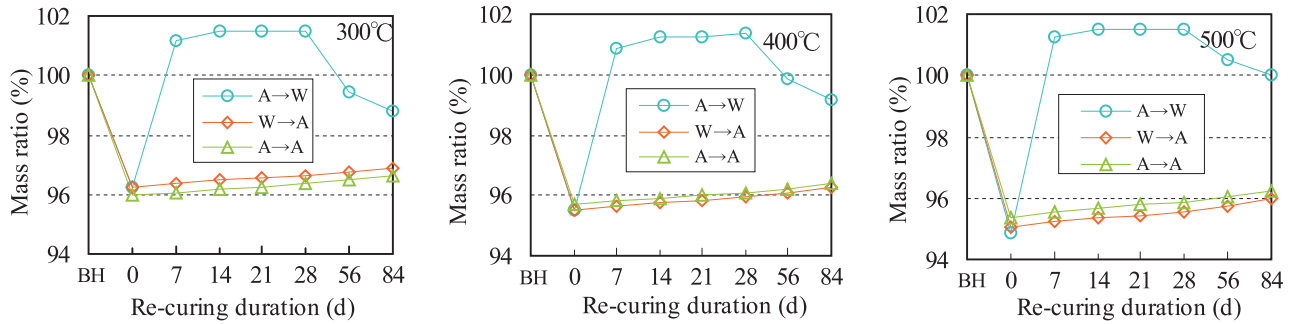


Fig. 1 Variation of mass ratio of concrete after to before heating with re-curing age (Series No. 1)

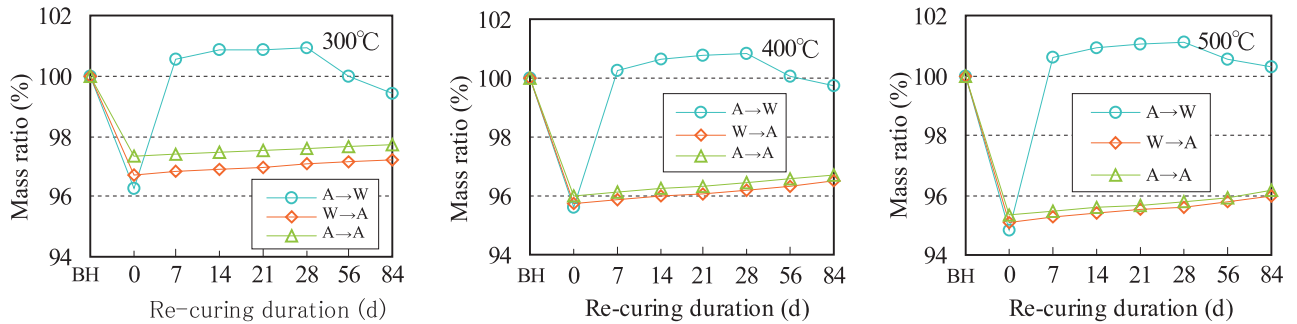


Fig. 2 Variation of mass ratio of concrete after to before heating with re-curing age (Series No. 2)

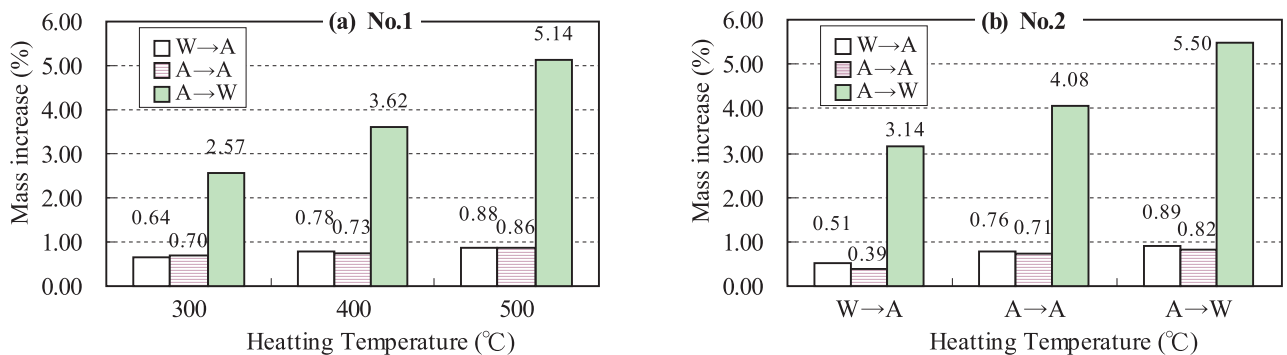


Fig. 3 Mass ratio increase at the age of 12 weeks, compared to the mass ratio just after heated

加熱温度が高いほど加熱前の強度大小に拘わらず大きく、500℃の加熱の場合には加熱前の質量を超えることが分かった。これは、受熱温度が高いほど熱分解による内部空隙が多く、吸湿は多いためであると思われる。

Fig. 3は、加熱直後に比べて12週間再養生後の質量増加率を示すものである。同図より12週間の空气中再養生をしても、No.1とNo.2の再養生後の質量は加熱直後より僅かに増加した。空气中再養生の場合、加熱後の質量があまり増加しないことが認められた。また、水冷却の場合は空气中冷却より質量比の増加が若干多い傾向が見られた。一方、水中再養生のパターンA→Wの場合、質量比は大幅に増加した。水中再養生は加熱されたコンクリートの質量回復を促進することが認められた。また、高強度コンクリート(シリーズNo.2)の方が水中再養生による回復率は高い。なお、冷却・養生方法と加熱前の強度に拘わらず、加熱温度は高いほど再養生による質量の増加は多い傾向が見られた。

3.2 長さの変化

JIS A 1129-2:2010に準じて加熱前後の長さ変化を測定しようとしたが、貼り付けた標線用ゲージプラグは加熱中に脱落したため、加熱前後の長さ変化を連続的に測定できなかった。加熱直後の長さを基長とした各再養生材齢の長さ変化率をそれぞれにFig.4とFig.5に示す。シリーズNo.2の冷却・再養生パターンA→Wの再養生材齢が8週までになっているのは、水中再養生の履歴で標線用ゲージプラグが脱落したためである。

ばらつきがあるが、コンクリートは加熱温度と加熱前の強度に拘わらず、加熱・冷却後に再養生すると長さが加熱直後より増加する傾向が見られた。Fig.6に示すように加熱温度が高いほど、または加熱前の強度が低いほど、長さの増加率は大きかった。この長さの増加は吸湿膨張と再水和反応によるものであろうと思われる。

冷却・再養生パターンW→AとA→Aの試験体は、殆ど1週間程度の再養生材齢まで長さが増加したが、その後あまり変わらなかった。一方、A→Wの場合、

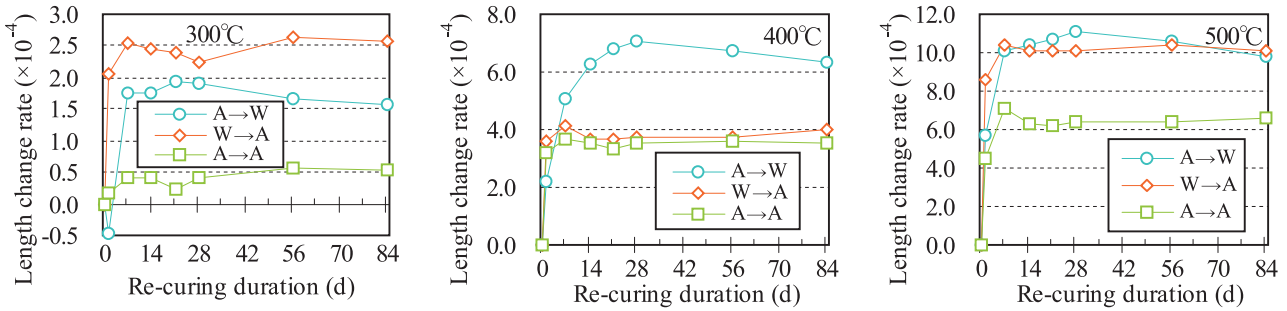


Fig. 4 Length change of concrete after heated (Series No. 1)

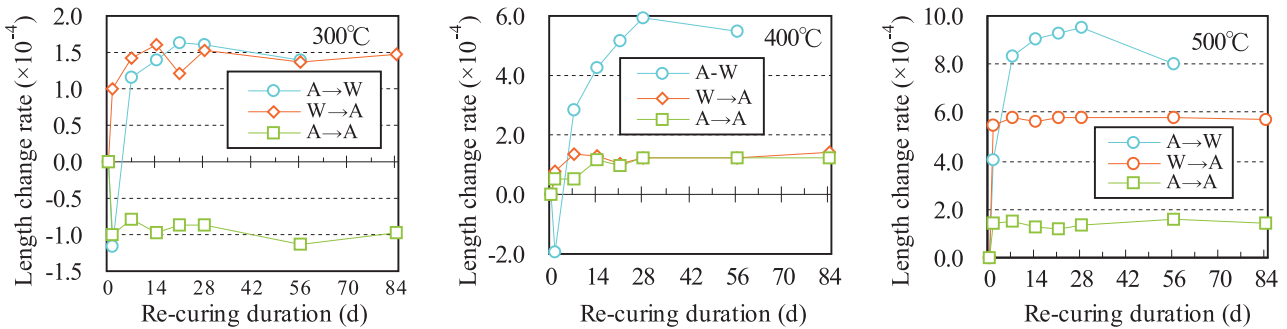


Fig. 5 Length change of concrete after heated (Series No. 2)

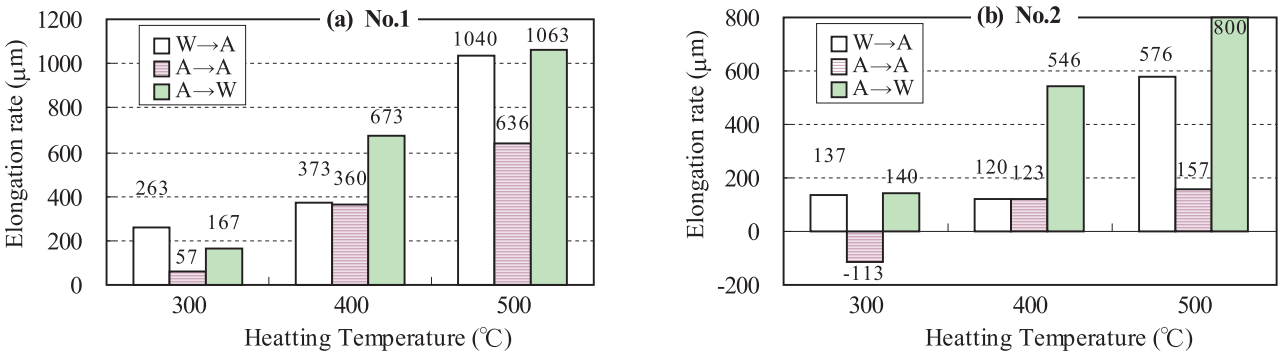


Fig. 6 Length increase rate at the age of 8 weeks, compared to the length just after heated

長さが4週まで増加したが、その後に減少した。4週間後に空气中再養生をすると、長さは減少したのは水分喪失による乾燥収縮を生じたためであると考えられる。

パターン A→A の試験体の長さ増加量は僅かであったが、W→A と A→W の試験体の増加は、300℃と500℃加熱の場合、最初の1週間や4週間に大きかった。

文献⁹⁾によって、コンクリートは450℃付近の温度で加熱されると、C-S-Hゲルが完全に分解するが、300℃の場合には相当なC-S-Hが存在し、500℃の場合には変質C-S-H(modified C-S-H)を生じる(Fig.7を参照)。パターンW→Aの試験体は冷却水を吸着したため、長さ変化率になんらかの影響(例えば水和反応)を受け、300℃と500℃加熱の場合にはパターンA→Wの試験体の長さ変化率とほぼ同程度であった。しかし、400℃加熱の場合、パターンW→AとA→Aの試験体の長さ変化率はほぼ同じであった。これは、400℃加熱で大量に分解したC-S-Hが再生するためには多量の水が必要であるが、水冷却でも十分な水を提供できず、空气中自然冷却の場合の再水和程度と大きな違いがないためであ

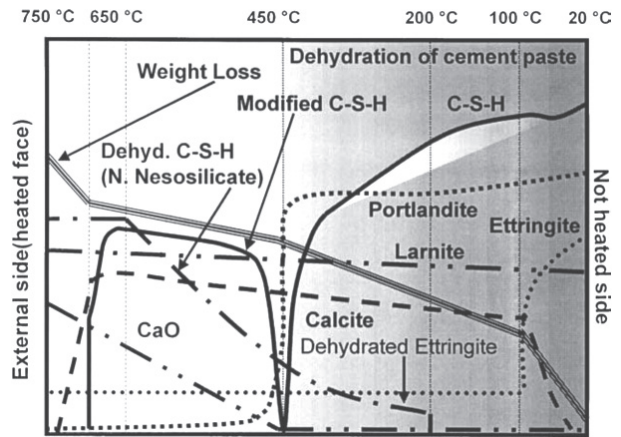


Fig. 7 Dehydration of cement paste exposed to high temperature⁹⁾

ろうと推測している。

3.3 動弾性係数

Fig.8とFig.9に2シリーズのコンクリートの加熱前後の動弾性係数比をそれぞれに示す。各試験体の動弾性

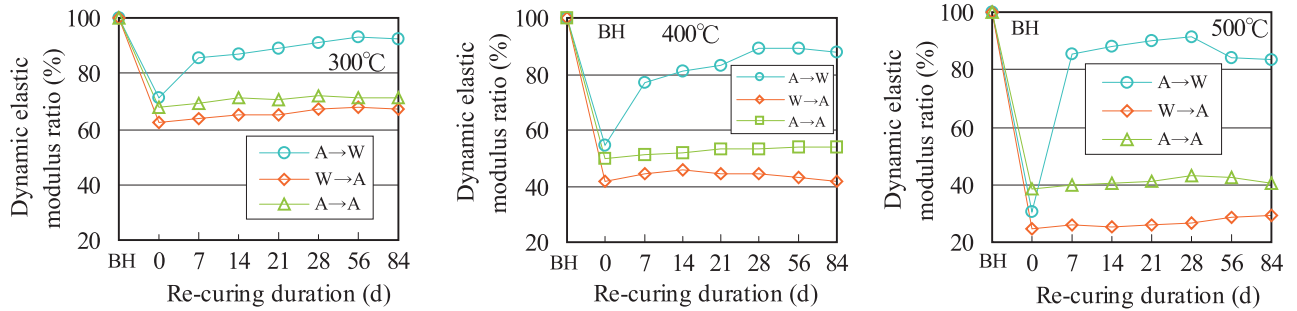


Fig. 8 Change of dynamic elastic modulus ratio of concrete after to before heating with re-curing age (Series No. 1)

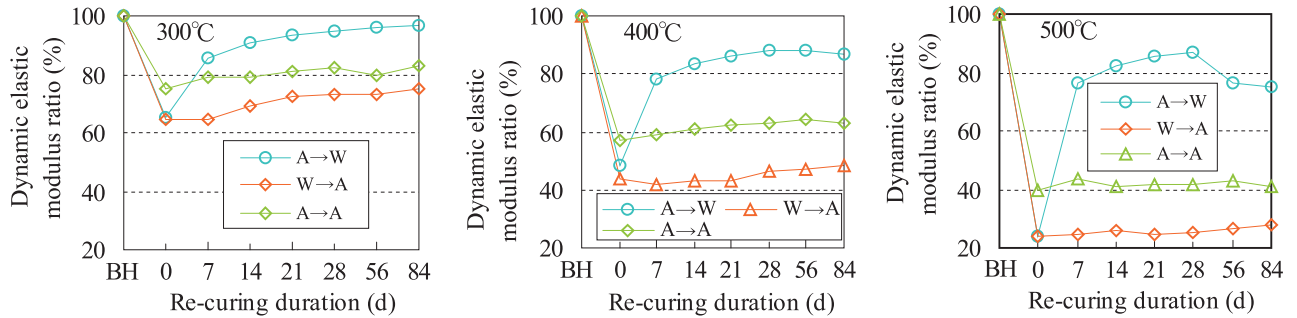


Fig. 9 Change of dynamic elastic modulus ratio of concrete after to before heating with re-curing age (Series No. 2)

係数は加熱によって大幅に減少した。加熱温度が 300 °C、400 °C および 500 °C の場合に、加熱直後に動弾性係数はそれぞれ 70 %、50 % および 30 % 程度しか残らなかった。特に水で冷却された試験体(パターン W→A)が空气中自然冷却の試験体(パターン W→A と A→A)より動弾性係数の低下は大きかった。また、加熱温度が高いほど動弾性係数の低下率は大きいことが認められた。

動弾性係数残存比は加熱後の再養生材齢の増加に伴って増加するが、およそ 4 週の再養生材齢に達すると、一定値に近づくまたは減少する傾向が見られた。文献¹⁷⁾によって、コンクリートの含水率が高いほど動弾性係数の測定値が大きい。水冷却時に吸水しても、再養生中に吸湿しても、パターン W→A と A→A の場合、動弾性係数の増加は、加熱温度と加熱前の強度に拘わらず僅かであった。したがって、加熱後に空气中再養生をしても動弾性係数の自己回復をほとんど期待できないと言える。この傾向は静弾性係数と同じである¹⁰⁾。

一方、パターン A→W の試験体の場合、Fig. 10 に示すように、加熱温度または加熱前の強度が小さいほど、12 週間の水中再養生後の残存動弾性係数は大きい傾向が見られた。4 週後の含水率は水中再養生時より小さいが、300 °C と 400 °C 加熱の場合には動弾性係数は小さくならない。これは、水和反応による回復挙動があったためであると考えられる。500 °C 加熱の場合、4 週後に動弾性係数が低減したのは、動弾性係数の乾燥による減少が水和生成物による増加より大きかったためと思われる。同じ温度で加熱された試験体の気中平衡含水率は同程度であるため、動弾性係数の測定結果に及ぼす吸湿の影響が同じと考えられる。そこで、パターン A→A の 12 週の結果を比べると、パターン A→W の水中再養生された試

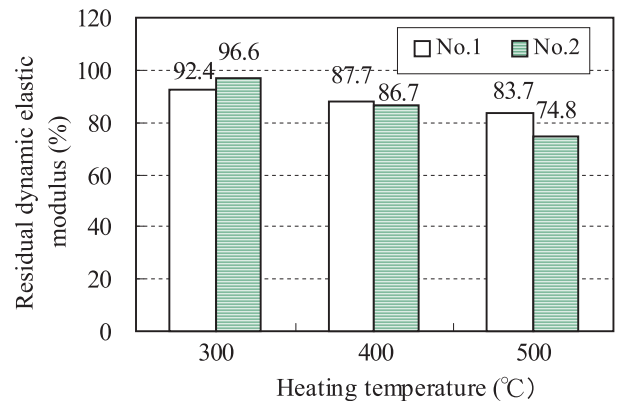


Fig. 10 Residual dynamic elastic modulus of heated concrete after 12 weeks re-curing in the water

験体の動弾性係数はある程度まで回復したと判断できる。

3.4 超音波速度

Fig. 11 と Fig. 12 に 2 シリーズのコンクリートの超音波速度と再養生期間の関係を示す。同図に示すように、コンクリートの超音波速度は受熱によって低下し、加熱直後の超音波速度は、加熱温度が高いほど小さい傾向が見られた。また、空气中自然冷却に比べ、水急冷却の場合における超音波速度は明らかに小さいことが認められた。水急冷却によってひび割れが多発したためであると考えられる。ひび割れや空隙が多いほどコンクリートの超音波速度が小さいのは一般に知られている。

加熱後の超音波速度は最初の 4 週間に再養生材齢とともに増加するが、その後に殆ど変わらないまたは減少する傾向が見られた。空气中再養生による超音波速度の増加は、400 °C と 500 °C 加熱温度の場合には僅かであったが、300 °C の場合には最初の 1 週間に多かった。これは、

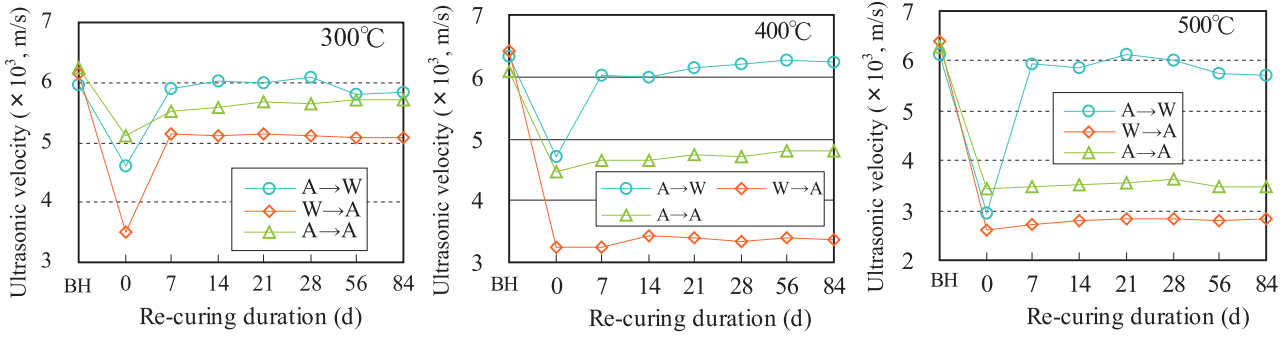


Fig. 11 Variation of ultrasonic velocity of heated concrete with re-curing duration (Series No. 1)

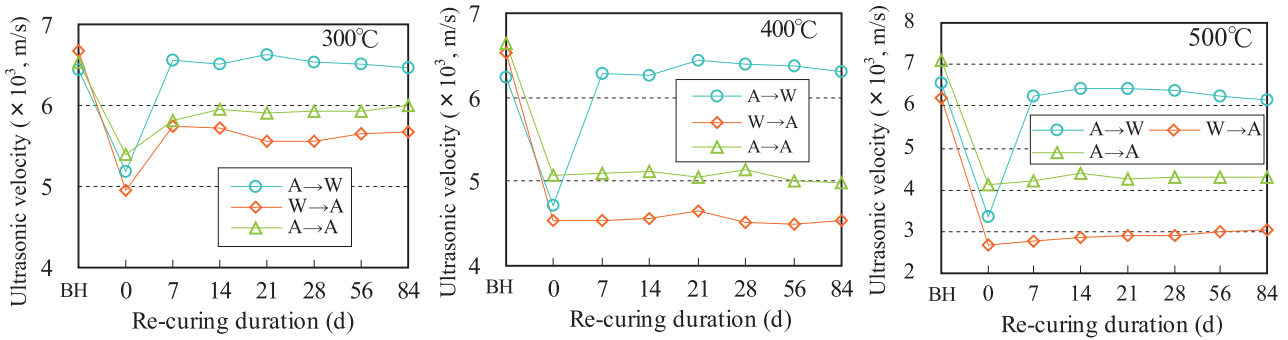


Fig. 12 Variation of ultrasonic velocity of heated concrete with re-curing duration (Series No. 2)

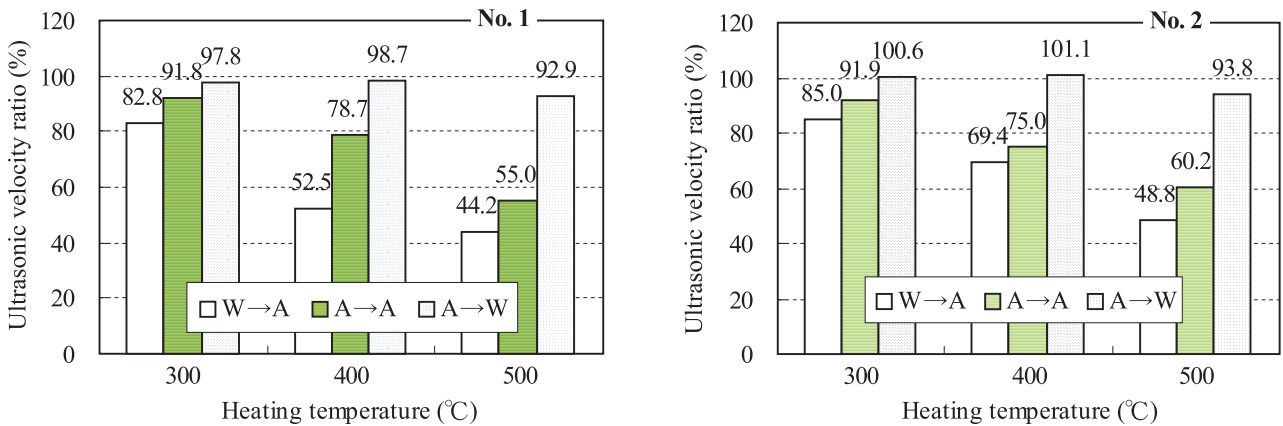


Fig. 13 Ultrasonic velocity ratio of heated concrete after 12 weeks re-curing to unheated concrete

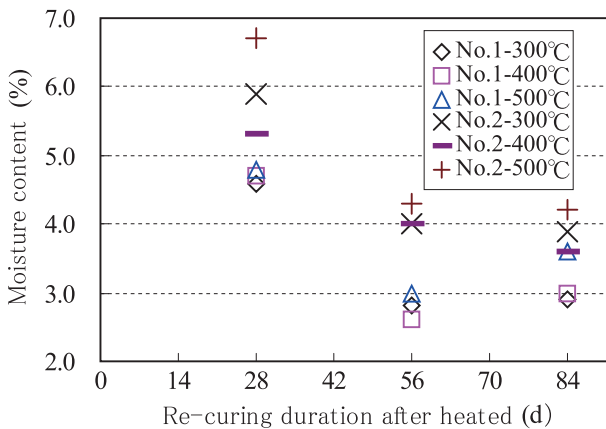


Fig. 14 Moisture content of concrete re-cured in the water for 28 days then in the air

加熱温度が 300 °C の場合に生じたひび割れが 400 °C と 500 °C の場合より少なく、吸湿による再水和生成物がひび割れを大きく減少したためであろうと推測している。

一方、水中再養生された試験体(パターン A→W)の超音波速度は、空气中再養生の試験体より明らかに大きかった(Fig. 13 を参照)。パターン A→W と A→A の 12 週材齢の試験結果を比較すると、受熱したコンクリートの超音波速度の水中再養生による回復が再水和反応によるものと判断できる。また、Fig. 13 より、加熱温度が高いほど 12 週の再養生材齢の超音波速度は小さいことが認められた。なお、300 °C と 400 °C 加熱の場合、パターン A→W の 12 週の超音波速度は加熱前より大きかったのは、再水和が発生し、吸湿が多かったためであると考えられる。

高強度コンクリート (No. 2) の方が、普通コンクリート

(No. 1)より12週の再養生後の超音波速度は高い傾向がFig. 13から見られた。シリーズ No. 2はNo. 1より吸湿は多かったのが一因であると思われる。Fig. 14に各試験体の再養生材齢ごとの含水率を示す。加熱温度または加熱前の強度が高いほど、吸水性は高い傾向が見られた。

4. まとめ

本研究では普通コンクリートと高強度コンクリートの加熱後の再養生による質量、長さ、動弾性係数および超音波伝播速度の変化と回復を考察し、これらの性能変化と回復に及ぼす加熱前の強度レベル、加熱温度、冷却方法、再養生方法および再養生材齢の影響について検討を行った。得られた結果をまとめると以下のようである。

4.1 質量変化について

- (1) コンクリートの受熱温度が高いほど質量減少は多い。300~500℃の場合、質量が3.5~5.0%減少する。
- (2) 300~500℃加熱されたコンクリートの質量は、空气中や水中再養生によって加熱直後より増加する。12週再養生後の質量は、空气中再養生のみの場合には加熱前の96%以上であり、最初の4週間に水中再養生された場合には加熱前の99%以上である。
- (3) 空气中再養生の場合、加熱温度が高いほど加熱後と加熱前の質量比は小さく、加熱直後より質量増加率は大きい。水中再養生の場合、質量比と質量増加率はともに大きい。
- (4) 空气中自然冷却より水冷却されたコンクリートの再養生による質量増加率は若干小さい。また、普通コンクリートより高強度コンクリートの水中再養生による質量増加率は大きい。

4.2 長さ変化について

- (1) 加熱されたコンクリートの長さは、再養生によって加熱直後より増加する。加熱温度が高いほど、または加熱前の強度が低いほど、長さの増加率は大きい。
- (2) 長さの増加期間は、空气中再養生の場合は最初の1週間であるが、水中再養生の場合は最初の4週間である。
- (3) 空气中に自然冷却・再養生されたコンクリートの長さは加熱直後より僅かに増加する。300℃と500℃加熱の場合、水冷却や水中再養生された試験体の長さの増加は大きい。
- (4) 加熱温度と加熱前の強度レベルに拘らず、水中再養生による長さの増加は、空气中再養生より明らかに大きい。

4.3 動弾性係数について

- (1) コンクリートの加熱直後の動弾性係数は、300℃、400℃および500℃の場合にそれぞれ加熱前の70%、50%および30%程度である。空气中自然冷却に比べ、水冷却の場合、動弾性係数の低下は多い。
- (2) 空气中再養生の場合、加熱温度と加熱前の強度に拘わらず、加熱後の再養生による動弾性係数の増加は僅かであり、空气中再養生による動弾性係数の回復

は殆ど期待できない。

- (3) 加熱温度または加熱前の強度は小さいほど、水中再養生による動弾性係数の増加は大きい。水中再養生によって動弾性係数はある程度まで回復できる。

4.4 超音波の伝播速度について

- (1) 加熱温度が高いほど、加熱されたコンクリートの超音波伝播速度の低下率は大きい。また、水冷却の場合は空气中自然冷却の場合より低下率は大きい。
- (2) 空气中再養生による超音波速度の増加は、加熱温度が400℃と500℃の場合には非常に少ない。
- (3) 水中再養生後と加熱前の超音波伝播速度比は、空气中再養生より明らかに大きい。水中再養生によって超音波伝播速度は90%以上回復できる。
- (4) 加熱温度が高いほど、水中再養生後の超音波伝播速度は小さい。また、加熱前の強度は高いほど、いずれの再養生方法でも再養生後と加熱前の超音波伝播速度比は大きい。

謝辞：

本研究の実施にあたっては山口大学工学部感性デザイン工学科 卒業生 麻川昂佑君の実験協力を得た。また、本研究は科学研究費補助金(基盤研究(B)、H25~H27年度、課題番号：25289185、研究代表者：李柱国)によるものである。ここに付記して謝意を表します。

参考文献：

- 1) 総務省消防庁：平成22年度消防白書、第1.1節
<http://www.fdma.go.jp/html/hakusho/h22/h22/html/1-1a-0.html>
- 2) 総務省消防庁：平成14年度消防白書、第1.1節
<http://www.fdma.go.jp/html/hakusho/h14/html/14186100.html>
- 3) 阿部武雄ほか：高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文集、No. 515、pp. 163-168 (1999)
- 4) J. Lee, Y. Xi, and K. Willam : Properties of concrete after high-temperature heating and cooling, ACI Materials Journal, Vol. 105, No. 4, pp. 334-341 (2008)
- 5) C. Poon, et al. : Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing, Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 1307-1318 (2001)
- 6) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説、pp. 85-87 (2015)
- 7) G. A. Khoury : Compressive strength of concrete at high temperatures : A reassessment, Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 161, pp. 291-309 (1992)
- 8) W. M. Lin et al. : Microstructures of fire-damaged concrete, ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 3,

- pp. 199-205 (1996)
- 9) C. Alonso, and L. Fernandez : Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments, *Journal of materials science*, Vol. 39, pp. 3015-3024 (2004)
 - 10) 李柱国、李慶濤 : 高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する研究、*日本建築学会構造系論文集*、Vol. 76、No. 666、pp. 1375-1382 (2011)
 - 11) 一瀬賢一ほか : 高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復、*コンクリート工学年次論文集*、Vol. 25、No. 1、pp. 353-358 (2003)
 - 12) E. Annerel, and L. Taerwe : Approaches for the assessment of the residual strength of concrete exposed to fire, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II* (Editors : Alexander et al.), Taylor & Francis Group, London, pp. 615-621 (2009)
 - 13) M. Henry, I. S. Darma, and T. Sugiyama : Characterization of crack geometry in fire-damaged high-strength concrete under re-curing using X-ray CT、*コンクリート工学年次論文集*、Vol. 35、No. 1、pp. 1177-1182 (2013)
 - 14) 鈴木将充ほか : 高温加熱を受けたモルタルの物理化学的性状に及ぼす再養生条件の影響、*Cement Science and Concrete Technology*、No. 63、pp. 148-154 (2009)
 - 15) G. T. C. Mohamedbhai, Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 38, No. 136, pp. 151-158 (1986)
 - 16) C. Gallé et al. : Effect of the heating rate on residual thermo-hydro-mechanical properties of high-strength concrete in the context of nuclear waste storage, *Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Prague, Czech Republic, Paper#H01-1, pp. 1-8 (2003)
 - 17) 岡島達雄ほか : コンクリートの弾性定数および超音波速度に及ぼす含水率の影響、*日本建築学会大会学術講演梗概集*、pp. 173-174 (1981)

CHANGE AND RECOVERY OF PROPERTIES OF FIRE-DAMAGED CONCRETE AFTER RE-CURING : MASS, LENGTH, DYNAMIC ELASTIC MODULUS AND ULTRASONIC VELOCITY

Zhuguo LI^{*1}, Yasuhiro RYUDA^{*2} and Daisuke SUGIHARA^{*2}

^{*1} YAMAGUCHI UNIVERSITY (2-16-1, Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611, Japan)

^{*2} JAPAN TESTING CENTER FOR CONSTRUCTION MATERIALS (Oaza Yamakawa, Sanyo Onoda-shi, Yamaguchi 757-0004, Japan)

ABSTRACT : In this study, we investigated experimentally the changes of mass (M), length (L), dynamic elastic modulus (E_d) and ultrasonic velocity (V_u) of heated concrete with re-curing duration, and discussed the effects of concrete strength before heating, heating temperatures, cooling methods, re-curing methods on these property changes. It is concluded that a) In case of re-curing in the water, M , L , E_d and V_u increase greatly in the first month, but in case of re-curing in the air they increase very slightly in the first week ; b) The higher heating temperature or compressive strength before heated, the smaller the M , E_d , and V_u , but the greater the recovery of there properties in case of water-re-curing. However, length increase of high strength concrete resulting from the water-re-curing is less than normal concrete ; c) water-cooling causes greater decrease in the E_d and V_u , but almost doesn't give obvious effect on the property recovery in the case of air-re-curing, compared to the air cooling.

KEY WORDS : Concrete, Fire damage, Re-curing, Property recovery, Mass, Volume change, Dynamic elastic modulus, Ultrasonic velocity