

特集 「火災に強い都市をめざして」

高温加熱を受けた高強度コンクリートの
力学特性の回復に関する研究

— 瀬 賢 —

Study on Recovery of Mechanical Properties
of High-Strength Concrete Subject to High Temperature Heating

Ken'ichi Ichise

Abstract

This report describes an experiment performed to determine the recovery of mechanical properties after heating, compressive strength and Young's Modulus with different curing methods and curing periods of high-strength concrete subjected to high temperatures. The following conclusions were drawn.

1) The compressive strength of high-strength concrete subjected to temperatures of up to 500 °C recovered up to 80% at the normal temperature with underwater curing. 2) Young's Modulus of high-strength concrete subjected to temperatures of up to 500 °C recovered up to 70% at the normal temperature with underwater curing. 3) The high-strength concrete can expect the recovery of compression strength and Young's Modulus by underwater curing after heating.

概 要

高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学特性の回復に着目し、高温加熱後の養生方法、養生期間の違いによる圧縮強度およびヤング係数に及ぼす影響について実験を行い、以下のことがわかった。

1) 高温加熱後の圧縮強度は、500 °C 以下の加熱であれば、水中養生を行うことにより常温時の80%まで回復できる。2) 高温加熱後のヤング係数も、500 °C 以下の加熱であれば、水中養生を行うことにより常温時の70%まで回復できる。3) 高強度コンクリートは、加熱後水分を供給することにより、圧縮強度やヤング係数の回復が期待できる。

1. はじめに

近年、設計基準強度60N/mm²級の高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造（以下RC造）の高層集合住宅が、都市部を中心として多数施工されてきている。通常、RC造は耐火構造として認められているものの、一旦、火災が生じるとその再使用においては、材料面・構造面における劣化診断が必要となる。劣化診断では、受熱温度の推定が最も重要であり、推定結果に基づき構造体の補修、補強が行われる。コンクリートに関しては、高温加熱後の力学特性の把握が重要であり、研究報告も増えつつある^{1), 2)}。また普通コンクリートの場合、被災後ある期間経過すると受熱温度が500 °C 以内であれば強度が回復し、再使用に耐えられるまで復元するという報告がある³⁾。同様に、ヤング係数についてもある程度復元することが報告されている³⁾。しかし高強度コンクリートにおける力学特性の回復に関する研究は、まだ少ない^{4), 5)}。もし普通強度のコンクリートと同様に回復が期待できるのであれば、補修・補強範囲も軽減できる可能性もある。

そこで本研究では、火災を受けた高強度コンクリートの力学特性の回復の有無に着目し、設計基準強度60N/mm²級の高強度コンクリートを対象として、高温加熱後の養

生方法、養生期間の違いによる圧縮強度およびヤング係数に及ぼす影響について実験を行い、その結果について考察した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件は、Table 1に示す加熱温度 6 水準、加熱後の養生方法 2 水準、加熱後の養生期間（直後を含め）6 水準をパラメータとした。なお供試体の表記方法は、原則として(1)加熱温度 - (2)加熱後の養生方法 - (3)加熱後の養生期間の順に略号で示した。

2.2 使用材料と調合

使用材料は、普通ポルトランドセメント、細骨材に木更津産山砂、粗骨材として青梅産砕石（硬質砂岩）を使用した。粗骨材は、Fc100N/mm²級まで十分適用できる骨材とした。骨材の品質をTable 2に示す。混和剤は、ポリカルボン酸系高分子化合物を主成分とする高性能AE減水剤を使用した。

調合条件は水セメント比30%とした。目標スランプフロー値は60±10cm、目標空気量は3.0±1.0%とした。コンクリートの調合をTable 3に示す。

2.3 測定項目と測定方法

測定項目は、フレッシュ性状、圧縮強度、動弾性係数、ヤング係数、質量変化および応力 - ひずみ関係とした。各測定は各JISに準じて実施した。供試体は 100×200mmを用いた。供試体の本数は各実験条件に対して3本とした。

2.4 コンクリートの打設と養生

コンクリートは、容量100L強制練りミキサを使用し、160L (80L×2バッチ) を1バッチとして3バッチ混練した。フレッシュ性状の測定後、供試体を採取した。供試体の採取は加熱温度ごとに区分した。コンクリートのフレッシュ性状および供試体の区分をTable 4に示す。3バッチとも目標のスランプフロー、空気量を満足しており、またバッチ間の差の小さいコンクリートを得ることができた。打設後は、20±3 の恒温室内で湿潤養生とし、翌日脱型し、材齢56日まで水中養生とした。材齢56日以降実験時までには、封かん養生とした。

2.5 加熱方法

加熱は、プログラム調節器付き電気炉を使用した。加熱時の供試体は、加熱中に水分逸散を認めるアンシール状態とした。加熱実験は、材齢91日から実施した。加熱速度は、既往の加熱後載荷試験¹⁾ (以下冷間試験) を参考とし、100 /hrとした。加熱パターンをFig. 1に示す。計画加熱温度到達後は、供試体内部温度が均一となるように計画加熱温度を24時間保持させた。降温は、炉内のファンを作動させながら自然冷却とした。炉内の雰囲気温度が50 以下になるまで供試体を炉内に放置した。各強度試験は、降温から5 ~12 時間後、常温下で行った。

2.6 加熱後の養生方法と養生期間

加熱後の供試体は、加熱直後の試験を行なう供試体を除いて、水中養生、気中養生 (20±3 , 60±5%R.H. の恒温恒湿室) とした。養生期間は、水中養生供試体については加熱後最大56日まで、気中養生供試体については加熱後最大182日までとした。

3 . 実験結果および考察

3.1 加熱前後の力学的性質

加熱温度と圧縮強度および圧縮強度残存比 (常温時の強度に対する各加熱温度、各養生後における圧縮強度の比) の関係をFig. 2に示す。文献1)の結果と同様、加熱温度300 までは常温時と同程度または若干高い強度を示し、300 を超えると強度低下を示した。圧縮強度残存比は、加熱温度300 までは、1.0~1.1を確保した。加熱温度300 以上では、加熱温度の上昇に伴い低下するものの、600 加熱後でも常温時の40%の圧縮強度を残存した。

Table 1 実験条件
Test Conditions

項目	摘要	水準数
加熱温度	100℃, 200℃, 300℃, 400℃, 500℃, 600℃	6
加熱後の養生	水中(W), 気中(A)*	2
加熱後の養生期間	0日, 7日, 28日, 56日, 91日, 182日	6

Table 2 骨材の品質
Quality of Aggregate

記号	骨材の種類	表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	吸水率 (%)
S	木更津産陸砂	2.59	2.79	1.83
G	青梅産碎石	2.66	6.72	0.81

Table 3 コンクリートの調査
Concrete Mixing Proportion

W/C (%)	単体量 (kg/m ³)				混和剤対セメント(%)
	W	C	S	G	
30	175	583	712	893	C×1.05%

Table 4 コンクリートのフレッシュ性状
Fresh Properties of Concrete

バッチ No.	対応加熱温度 (℃)	スランプ フロー (cm×cm)	単位容積質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	温度 (℃)
30-1	20	64.0×62.0	2309	3.3	27.5
	100 200				
30-2	300	64.0×65.0	2320	3.5	27.0
	400				
30-3	500	66.0×66.0	2331	3.4	27.0
	600				

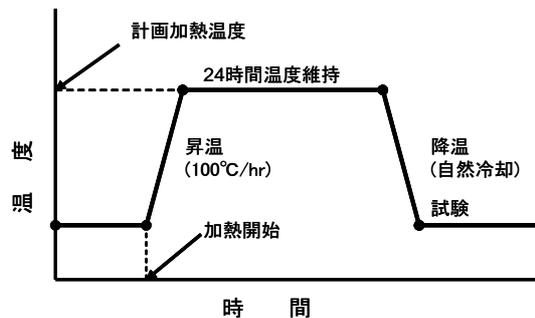


Fig. 1 加熱曲線
Heating Curve

加熱温度とヤング係数およびヤング係数残存比 (常温時のヤング係数に対する各加熱温度、各養生後におけるヤング係数の比) の関係をFig. 3に示す。ヤング係数も文献1)の結果と同様、加熱温度100 以上では加熱温度が高いほど低下した。また600 加熱後は、常温時の10%以下まで低下した。

3.2 圧縮強度

加熱後の養生材齢と圧縮強度の関係をFig. 4に、加熱

後の養生材齢と圧縮強度残存比の関係をFig. 5に示す。また加熱後の養生材齢と圧縮強度回復比（加熱後の圧縮強度に対する各養生材齢後の圧縮強度の比）をFig. 6に示す。これらの結果から、加熱後の養生方法の違いにより、その後の強度は大きく異なることがわかった。

水中養生の場合、加熱温度300 までは加熱直後の圧縮強度が高く、その後は養生した供試体の強度が低い。しかし、加熱温度500 , 600 では、養生した方が高く、特に養生材齢7 日までの強度増加が大きい。この強度増加は、文献6) に示すように脱水により生じたCaO が、水分の供給により急速な発熱反応を起こし、再びCa(OH)₂になったものと推察される。また加熱温度500 以下であれば、常温時の圧縮強度の80% 以上まで回復することがわかった。加熱温度600 の場合、加熱直後では常温時の約40% であるが、養生材齢7 日の水中養生で60%、養生材齢56日で70%まで回復することがわかった。これを圧縮強度回復比表すと、加熱後水中養生した場合、養生材齢7日で40%、養生材齢56日で50~60%の強度回復を示した。

気中養生の場合は、加熱直後では加熱温度200 の圧縮強度が最も大きな値を示した。養生材齢7 日以降では加熱温度100 の供試体の方が高い強度を示し、その後も若干の強度増加を示し、常温時よりも高い強度を示した。加熱温度200 以上の供試体は、養生材齢7日の方が加熱直後よりも低い強度を示し、その後の強度変化は小

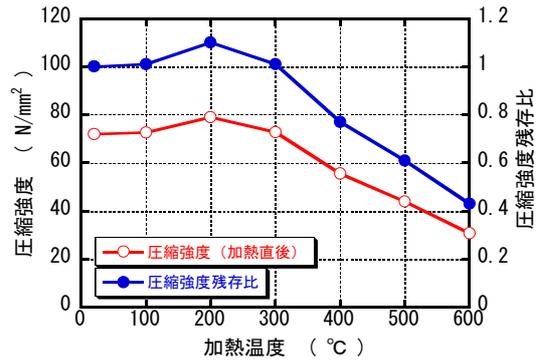


Fig. 2 圧縮強度と圧縮強度残存比
Compressive Strength and Retained Ratio of Compressive Strength

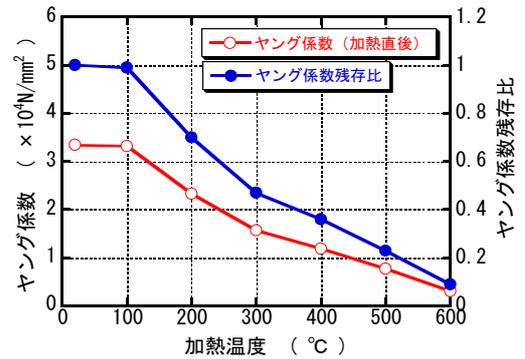


Fig. 3 ヤング係数とヤング係数残存比
Young's Modulus and Retained Ratio of Young's Modulus

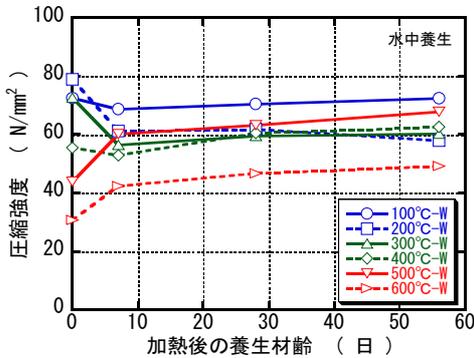


Fig. 4(a) 養生材齢と圧縮強度 (水中養生)
Curing Age and Compressive Strength (Water Curing)

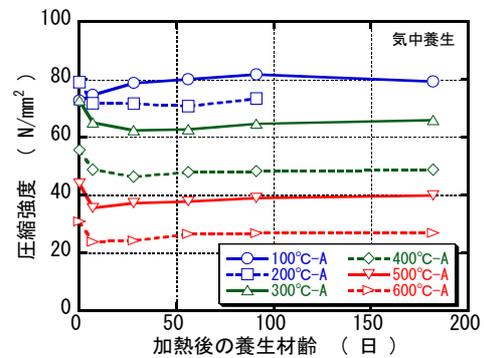


Fig. 4(b) 養生材齢と圧縮強度 (気中養生)
Curing Age and Compressive Strength (Air Curing)

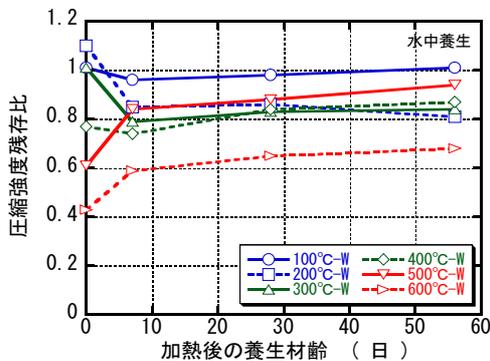


Fig. 5(a) 養生材齢と圧縮強度残存比 (水中養生)
Curing Age and Retained Ratio of Compressive Strength (Water Curing)

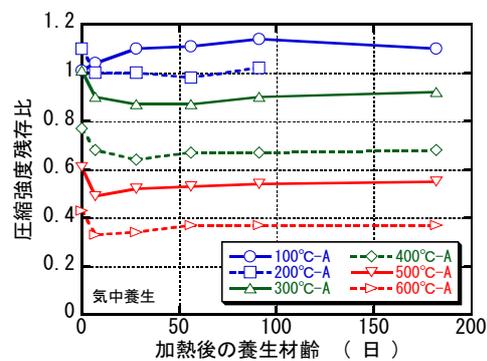


Fig. 5(b) 養生材齢と圧縮強度残存比 (気中養生)
Curing Age and Retained Ratio of Compressive Strength (Air Curing)

さいことがわかった。また加熱後気中養生した供試体の圧縮強度は、加熱温度の高いものほど低いことがわかった。また圧縮強度回復比でも加熱温度100 の場合を除けば、加熱直後の圧縮強度より低くなるのがわかる。このように水中養生に比べ気中養生での強度回復が小さい理由としては、水分の供給の有無が大きく関与したものと推察できる。

3.3 ヤング係数

加熱後の養生材齢とヤング係数の関係をFig. 7, また加熱後の養生材齢とヤング係数残存比の関係をFig. 8に示す。また加熱後の養生材齢とヤング係数回復比(加熱

後のヤング係数に対する各養生材齢後のヤング係数の比)をFig. 9に示す。圧縮強度と同様にヤング係数においても加熱後の養生により、大きくその後の性状が異なることが認められた。

水中養生の場合は、加熱温度200 以上においてヤング係数の回復が認められた。特に加熱温度300 以上では養生材齢28日までの回復が大きい。加熱温度500 までであれば、常温時の70%まで回復した。また加熱温度600 では、加熱直後で常温時の10%まで低下するが、養生材齢56日では約50%と大きく回復した。

一方気中養生した場合は、加熱直後の値からの変化は小さく、加熱温度が高いほどヤング係数残存比も小さな

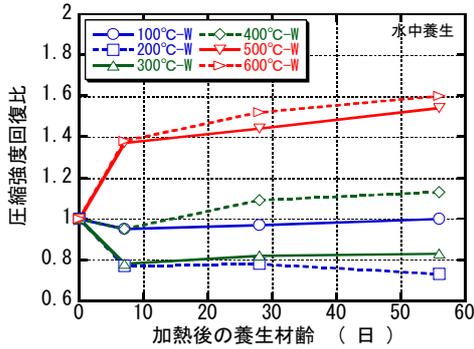


Fig. 6(a) 養生材齢と圧縮強度回復比 (水中養生)
Curing Age and Recovery Ratio of Compressive Strength (Water Curing)

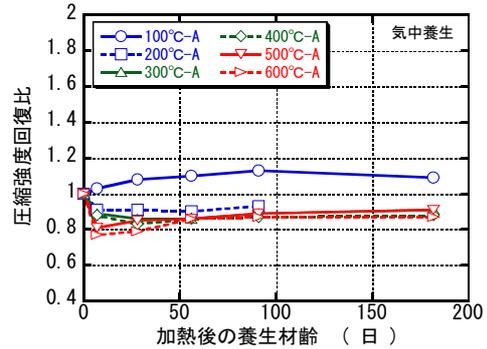


Fig. 6(b) 養生材齢と圧縮強度回復比 (気中養生)
Curing Age and Recovery Ratio of Compressive Strength (Air Curing)

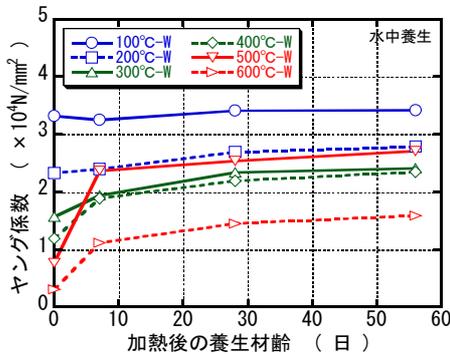


Fig. 7(a) 養生材齢とヤング係数 (水中養生)
Curing Age and Young's Modulus (Water Curing)

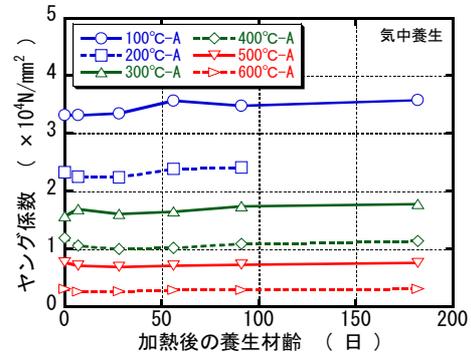


Fig. 7(b) 養生材齢とヤング係数 (気中養生)
Curing Age and Young's Modulus (Air Curing)

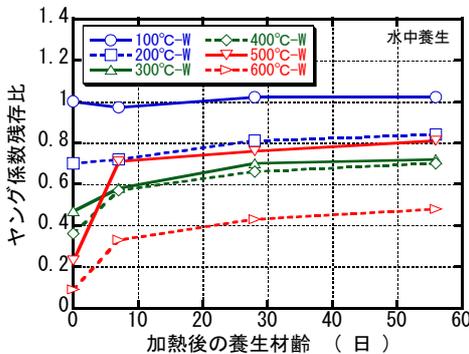


Fig. 8(a) 養生材齢とヤング係数残存比 (水中養生)
Curing Age and Retained Ratio of Young's Modulus (Water Curing)

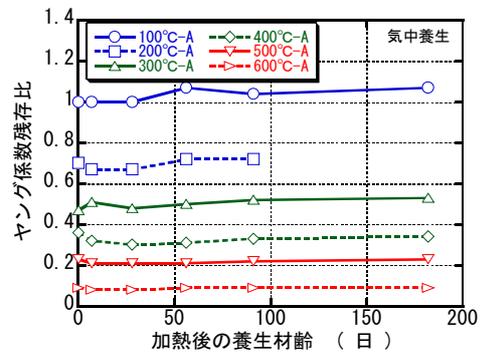


Fig. 8(b) 養生材齢とヤング係数残存比 (水中養生)
Curing Age and Retained Ratio of Young's Modulus (Air Curing)

値を示した。ヤング係数も圧縮強度と同様に、養生方法の違いによる吸水の差が回復の差として現れたものと推察する。

3.4 動弾性係数

ヤング係数と動弾性係数の関係をFig. 10に示す。気中養生の場合は、ヤング係数と動弾性係数の関係は、養生期間に関係なく既往の結果¹⁾と同様に、相関関係が認められた。しかし、加熱後水中養生した供試体は、加熱温度が高いものほどヤング係数に比べ動弾性係数が大きな値を示した。これは、加熱後の吸水により、供試体の質量が大きくなったため、見かけ上動弾性係数が大きくなったものと推察される⁷⁾。

3.5 質量変化率

加熱後の養生材齢と質量変化率（高温加熱前の質量に対する加熱後または養生後の質量の増減を百分率で示したもの）の関係をFig. 11に示す。この結果から、加熱後水中養生した供試体は、養生材齢7日から28日までに加熱温度の高い供試体の吸水が大きい。特に加熱温度600 の吸水が著しい。これは、加熱により生じたひび割れが吸水を容易にさせ、またCaOからCa(OH)₂への発熱反応に使用されたものと推察できる。一方、気中養生の場合は、加熱直後に比べて1.2%~4.0%程度質量が大きくなった。また加熱温度が高いものほど質量の回復が大き

くなった。

3.6 応力 - ひずみ関係

養生後の応力 - ひずみ関係の一例をFig. 12, Fig. 13に示す。加熱温度300 の場合、その後の養生方法の違いの影響は、小さいことがわかる。しかし加熱温度600 の場合は、水中養生と気中養生では大きく異なった。気中養生では、加熱後とほとんど差が無いものの、水中養生では、加熱温度400 以上において圧縮強度、ヤング係数の回復が大きいため、加熱直後と養生材齢7日以降の応力 - ひずみ関係が大きく異なった。これは、3.2 および3.3で述べた再水和の影響と推察される⁶⁾。加熱後

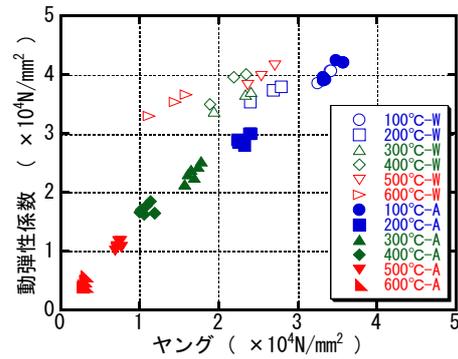


Fig. 10 ヤング係数と動弾性係数
Young's Modulus and Dynamic Modulus of Elasticity

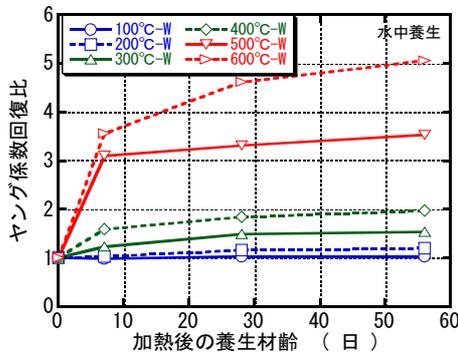


Fig. 9(a) 養生材齢とヤング係数回復比 (水中養生)
Curing Age and Recovery Ratio of Young's Modulus (Water Curing)

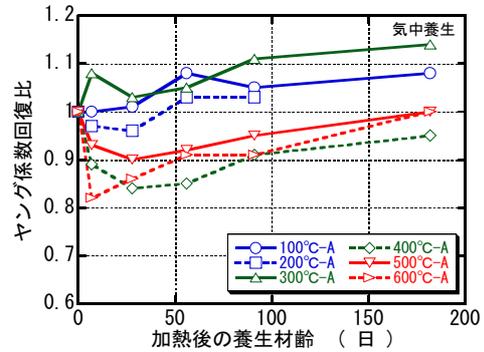


Fig. 9(b) 養生材齢とヤング係数回復比 (気中養生)
Curing Age and Recovery Ratio of Young's Modulus (Air Curing)

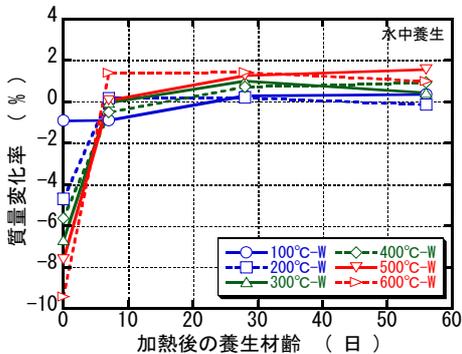


Fig. 11(a) 養生材齢と質量変化率 (水中養生)
Curing Age and Mass Reducing Ratio (Water Curing)

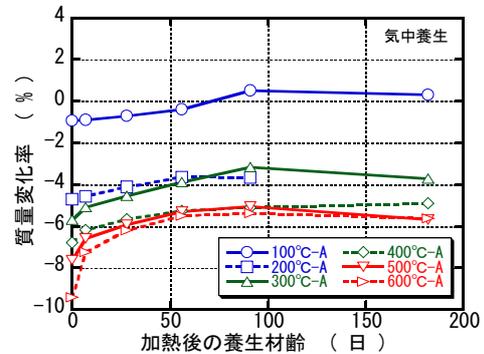


Fig. 11(b) 養生材齢と質量変化率 (気中養生)
Curing Age and Mass Reducing Ratio (Air Curing)

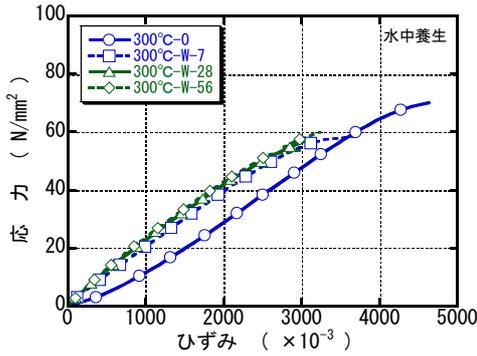


Fig. 12(a) 応力 - ひずみ曲線 (300 °C・水中養生)
Stress-Strain Curve (300 °C・Water Curing)

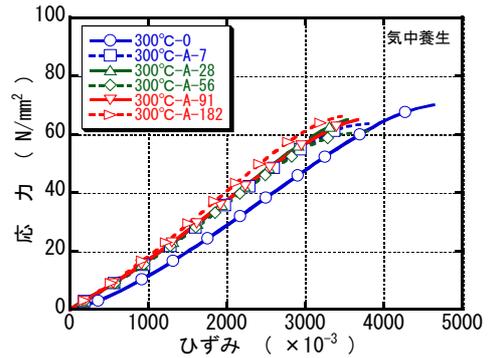


Fig. 12(b) 応力 - ひずみ曲線 (300 °C・気中養生)
Stress-Strain Curve (300 °C・Air Curing)

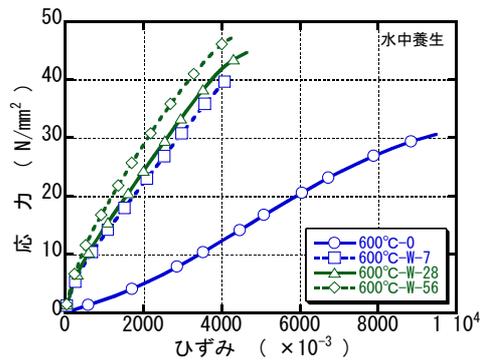


Fig. 13(a) 応力 - ひずみ曲線 (600 °C・水中養生)
Stress-Strain Curve (600 °C・Water Curing)

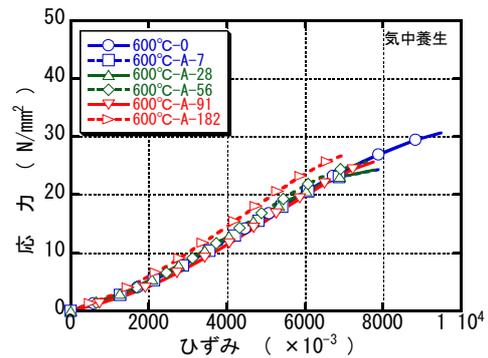


Fig. 13(b) 応力 - ひずみ曲線 (600 °C・気中養生)
Stress-Strain Curve (600 °C・Air Curing)

および気中養生では、S字型の応力 - ひずみ曲線を示している。これは、文献²⁾で考察されているように熱応力によって供試体内部に発生している微細ひび割れの影響によるものと考えられる。

4. まとめ

高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学特性の回復に着目し、養生方法、養生期間の違いによる圧縮強度およびヤング係数等に及ぼす影響について実験を行い、以下のことがわかった。

- 1) 高温加熱後の圧縮強度は、500 以下の加熱であれば、水中養生を行うことにより常温時の80%まで回復できる。
- 2) 高温加熱後のヤング係数も、500 以下の加熱であれば、水中養生を行うことにより常温時の70%まで回復できる。
- 3) 高強度コンクリートは、加熱後水分を供給することにより、圧縮強度やヤング係数の回復を期待できる。
- 4) 加熱温度400 を超えると、養生方法によって応力 - ひずみ曲線が大きく異なる。

参考文献

- 1) 一瀬賢一，他：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第541号，pp.23-30，2001.3
- 2) 安部武雄，他：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，第515号，pp.163-168，1999.1
- 3) 原田 有：建築耐火構法，工業調査会，1973.8
- 4) 土井文好，他：超高強度コンクリートの熱的性質に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.109-114，1993.
- 5) Chi-Sun Poon et al. : Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing, Cement and Concrete Research 31, pp.1307-1318, 2001
- 6) 田中弘文，他：セメント硬化体の加熱後の性質と再水和，セメント技術年報，No.36，pp.45-48，1982
- 7) 岡島達雄，他：セメント硬化体の弾性定数および超音波伝播速度に及ぼす含水率の影響，セメント技術年報，No.35，pp.126-129，1981