

高温加熱し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

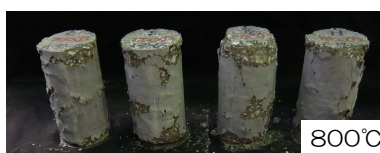
宮野 和樹^{*1}・梶田 秀幸^{*1}

Experimental Study on Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperature

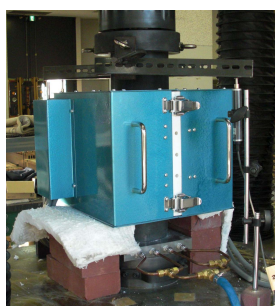
Kazuki MIYANO, Hideyuki KAJITA



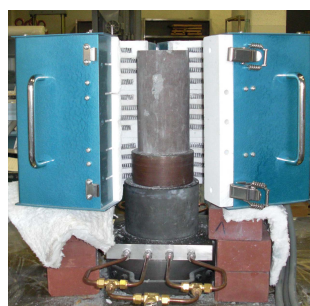
写真-1 加熱冷却後の供試体状況



800℃



高温時の圧縮試験の状況



圧縮試験実施後の状況

写真-2 予熱炉を用いた高温時の圧縮試験の状況

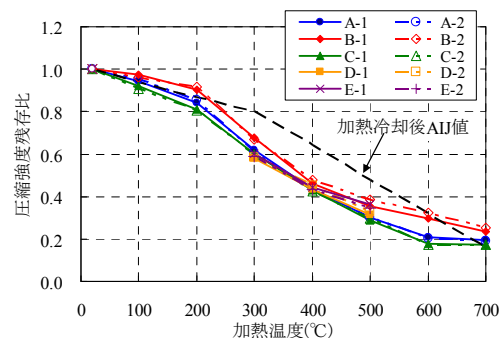


図-1 加熱冷却後の
加熱温度と圧縮強度残存比の関係

研究の目的

コンクリート充填鋼管造（以下、CFT 造と略記）は、優れた剛性・耐力・変形性能を有するため、多様な建物種類・用途へ採用されている。CFT 造を適用するにあたっては、火災時に、鋼管および充填コンクリートが所定の温度以上とならないように、鋼管に耐火被覆を施すことが一般的である。CFT 造柱に使用する充填コンクリートは、適度な流動性が必要であることから高強度コンクリートを使用することが多いが、高温加熱された高強度コンクリートの力学的性質に関する基礎データの蓄積は十分ではないのが現状である。

そこで、本研究では、高温加熱した高強度コンクリートの力学的性質に関する基礎データを収集することを目的として、設計基準強度 60N/mm^2 クラスのコンクリートを対象に、加熱冷却後の力学的性質について実験的に検討した。また、一部の調合のコンクリートについて、予熱炉を用いた高温時における力学的性質についても実験的に検討した。

技術の説明

設計基準強度 60N/mm^2 クラスのコンクリートを対象に、5 つのレディーミクストコンクリート工場のコンクリートを用い、多少の調合および使用材料の違いが、加熱冷却後の力学的性質に及ぼす影響について実験的に検討した。加熱温度は $100\sim 800^\circ\text{C}$ で 100°C ごとに設定し、加熱温度による圧縮強度とヤング係数の値を確認した。また、一部の調合では、予熱炉を用いて加熱温度を 500°C に設定し、 500°C 中での圧縮強度およびヤング係数の値を確認した。

主な結論

加熱冷却後および高温加熱時の圧縮強度およびヤング係数は、加熱温度が高くなるにつれて低下することを確認した。また、圧縮強度およびヤング係数について、それぞれの残存比（常温時の値に対する各加熱温度での値の比）を把握した。さらに、加熱冷却後および高温加熱時の圧縮強度およびヤング係数は、使用材料が同一であれば水セメント比が若干異なっても、ほぼ同程度の値となることを確認した。

*1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

高温加熱し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

宮 野 和 樹^{*1} 梶 田 秀 幸^{*1}

要 旨

コンクリート充填鋼管造を適用するにあたっては、火災時に、鋼管および充填コンクリートが所定の温度とならないように、鋼管に耐火被覆を施すことが一般的である。コンクリート充填鋼管造柱に使用するコンクリートは、適度な流動性が必要であることから高強度コンクリートを使用することが多い。しかし、高温加熱された高強度コンクリートの力学的性質に関する基礎データの蓄積は十分ではないのが現状である。そこで、本研究では、高温加熱した高強度コンクリートの力学的性質に関する基礎データを収集することを目的として、設計基準強度 60N/mm^2 クラスのコンクリートを対象に、加熱冷却後の力学的性質および予熱炉を用いた高温時における力学的性質について実験的に検討した。

その結果、加熱冷却後および高温時の圧縮強度およびヤング係数の、それぞれの残存比（常温時の値に対する各加熱温度の値の比）を把握した。また、加熱冷却後および高温加熱時の圧縮強度およびヤング係数は、使用材料が同一であれば、水セメント比が若干異なっても、ほぼ同程度の値となった。

キーワード 高強度コンクリート／高温加熱／圧縮強度／ヤング係数／加熱冷却後試験／高温圧縮試験／予熱炉

目 次

- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1. はじめに | 3. 高温時における
高強度コンクリートの素材実験 |
| 2. 加熱冷却後における
高強度コンクリートの素材実験 | 4. まとめ |

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE AT HIGH TEMPERATURE

Kazuki MIYANO

Hideyuki KAJITA

Synopsis:

The purpose of this study is to collect the data of the mechanical properties of high strength concrete (the design strength of concrete is about 60N/mm^2) after high temperature exposure and at high temperature exposure. The following conclusions were obtained. The compressive strength and Young's modulus after high temperature exposure and at high temperature exposure becomes low as heating temperature becomes high. The ratio of the compressive strength and Young's modulus in each heating temperature to the value of normal temperature has been grasped. When use material was the same, compressive strength and Young's modulus after high temperature exposure and at high temperature exposure became a comparable value even if water-cement ratio differed a little.

* 1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ

1. はじめに

コンクリート充填鋼管造（以下、CFT 造と略記）は、優れた剛性・耐力・変形性能を有するため、多様な建物種類・用途へ採用されている。CFT 造を適用するにあたっては、火災時に、鋼管および充填コンクリートが所定の温度以上とならないように、鋼管に耐火被覆を施すことが一般的である。CFT 造柱に使用する充填コンクリートは、適度な流動性が必要であることから高強度コンクリートを使用することが多いが、高温加熱された高強度コンクリートの力学的性質に関する基礎データの蓄積は十分ではないのが現状である。

そこで、本研究では、高温加熱した高強度コンクリートの力学的性質に関する基礎データを収集することを目的として、設計基準強度 60N/mm² クラスのコンクリートを対象に、異なる 5 つのレディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場と略記）のコンクリートを用い、多少の調合および使用材料の違いが、加熱冷却後の力学的性質に及ぼす影響について実験的に検討した。また、一部の調合のコンクリートについて、予熱炉を用いた高温時における力学的性質についても実験的に検討した。

設計基準強度 60N/mm² クラスのコンクリートには、JIS 認証品の高強度コンクリート（以下、JIS 高強度コンと略記）と建築基準法第 37 条認定品の高強度コンクリート（以下、37 条高強度コンと略記）の 2 種類あることから、この 2 種類について実験を実施することとした。

2. 加熱冷却後における高強度コンクリートの素材実験

2.1 実験概要

(1) 実験条件および供試体

実験の要因と水準を表-1 に、生コン工場とコンクリートの種類および呼び方を表-2 に、コンクリートの使用材料を表-3 に、調合を表-4 に示す。生コン工場は 5 水準とし、コンクリートの種類は JIS 高強度コンと 37 条高強度コンの 2 水準とした。コンクリートの種類は、JIS 高強度コン（調合名 1）は呼び強度 60 の JIS 認証品の調合とし、37 条高強度コン（調合名 2）は JIS 高強度コンの W/C と近い大臣認定品とした。加熱温度は A、B、C 工場で常温（非加熱）および 100℃～800℃まで 100℃刻みの 9 水準、D、E 工場で常温（非加熱）および 300、400、500℃の 4 水準とした。表-3、表-4 に示すように、生コン工場とコンクリートの種類の組合せによって、セメント種類、細骨材種類、粗骨材種類、調合が多少異なる。

コンクリートは目標スランプフローを 60cm、目標空気量を 3.0%とした。

供試体条件を表-5 に示す。供試体はφ100×200mm とし、JIS A 1132 により製作した。供試体数はばらつきを考慮するため、A 工場の調合は 8 体、それ以外の調合が 4 体とした。各供試体は、コンクリート打設翌日に脱型し、

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
生コン工場	A工場、B工場、C工場、D工場、E工場
コンクリートの種類	各工場2種類（設計基準強度60N/mm ² 程度）
加熱温度	・常温、100℃、200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃、800℃（A、B、C工場） ・常温、300℃、400℃、500℃（D、E工場）

表-2 コンクリートの種類および呼び方

生コン工場	コンクリートの種類および呼び方	調合名
A	JIS高強度コン(60-60-20M)	A-1
	37条高強度コン(60-60-20M)	A-2
B	JIS高強度コン(60-60-20L)	B-1
	37条高強度コン(60-60-20L)	B-2
C	JIS高強度コン(60-60-20N)	C-1
	37条高強度コン(61-60-20N)	C-2
D	JIS高強度コン(60-60-20N)	D-1
	37条高強度コン(61-60-20N)	D-2
E	JIS高強度コン(60-60-20N)	E-1
	37条高強度コン(62-60-20N)	E-2

表-3 使用材料

生コン工場	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
A	中庸熱ポルトランドセメント	万田野産山砂、戸高産石灰石砕砂	嵯朗産石灰砕石	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
B	低熱ポルトランドセメント	佐野市産石灰石砕砂、行方市産陸砂	佐野市産石灰砕石	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
C	普通ポルトランドセメント	千葉県君津市産山砂	西多摩郡産砂岩砕石、美祢市産石灰砕石	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
D	普通ポルトランドセメント	富津市産山砂、八戸市産石灰石砕砂	八戸市産石灰砕石	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
E	普通ポルトランドセメント	栃木市産石灰石砕砂、成田市産山砂	秩父郡産石灰砕石、栃木市産石灰砕石	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表-4 調合

生コン工場	調合名	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (C×%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
A	A-1	31.3	170	543	809	867	1.40
	A-2	33.0	170	515	833	867	1.40
B	B-1	30.0	165	550	810	891	1.85
	B-2	32.0	165	516	848	883	1.85
C	C-1	33.1	170	514	829	850	1.65
	C-2	32.6	170	521	824	850	1.65
D	D-1	33.7	170	505	834	869	1.45
	D-2	33.2	170	512	828	869	1.45
E	E-1	34.0	170	500	802	915	1.40
	E-2	33.0	170	516	788	915	1.40

表-5 供試体条件

項目	条件
供試体寸法	φ100×200mm
供試体数	8体(A工場) 4体(B、C、D、E工場)
供試体打設から加熱までの養生条件および養生期間	翌日脱型し材齢28日まで標準養生、その後温度20℃湿度60%で気中養生 養生期間はコンクリート打設から6ヶ月以上

材齢 28 日程度まで標準養生，その後 5 ヶ月以上温度 20℃湿度 60%で気中養生し，その後加熱を実施した．加熱までの材齢が 3 ヶ月～12 ヶ月の範囲では高強度コンクリートの高温時力学的性状について材齢がほとんど影響しない¹⁾といわれていることから，標準養生と乾燥期間をあわせて 6 ヶ月以上とした．これより，加熱実験の期間が長期に渡ったが，加熱時の材齢の違いによる供試体間の高温力学性状への影響は小さいと考えられる．

また，常温の供試体は，コンクリート打設翌日に脱型し，材齢 28 日程度まで標準養生，その後，温度 20℃湿度 60%で気中養生した．

(2) 加熱実験方法

供試体の加熱は 100℃では乾燥炉，200～800℃ではプログラム調節機能を有した電気炉を用いた．乾燥炉の外観を写真-1 に，電気炉の外観を写真-2 に示す．

加熱スケジュールを図-1 に示す．加熱スケジュールは，文献 2)を参考に，昇温速度を 1℃/分，100℃毎の停滞時間を 100℃および 200℃で 5 時間，300℃および 400℃で 3 時間，500℃以上で 1 時間とし，炉内温度が目標温度に到達してからは，上記プラス 2 時間以上停滞させた．目標温度での停滞後は自然冷却とした．なお，目標温度に対する制御温度は，目標温度+5℃とした．

供試体および炉内温度測定用熱電対の配置を図-2 に示す．加熱する供試体は 18 体(1 段)とし，中央の供試体 2 体に温度測定用の熱電対を埋め込んだ．

(3) 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験を JIS A 1108 により実施した．圧縮強度試験時に荷重およびひずみを測定し，その値により応力-ひずみ曲線を求め，その曲線から，ヤング係数(圧縮強度の 1/3 割線係数)を算出した．

試験は，加熱後 28～43 日間，温度 20℃湿度 60%で気中養生した後実施した．高強度コンクリートは，加熱後に温度 20℃湿度 60%で気中養生した場合，加熱後 14 日から 91 日までの圧縮強度およびヤング係数の変化は小さいといわれている³⁾ため，この期間に実施した．

常温の供試体は，加熱した供試体と同時期に圧縮強度試験を実施した．

2.2 実験結果

(1) フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリート試験結果を表-6 に示す．スランプフロー，空気量ともにすべての調合において品質基準(スランプフロー 60 ± 10 cm，空気量 $3.0 \pm 1.5\%$)を満足した．

(2) 加熱温度測定結果

温度測定結果の一例として，A 工場の加熱温度 600℃の



写真-1 乾燥炉の外観



写真-2 電気炉の外観

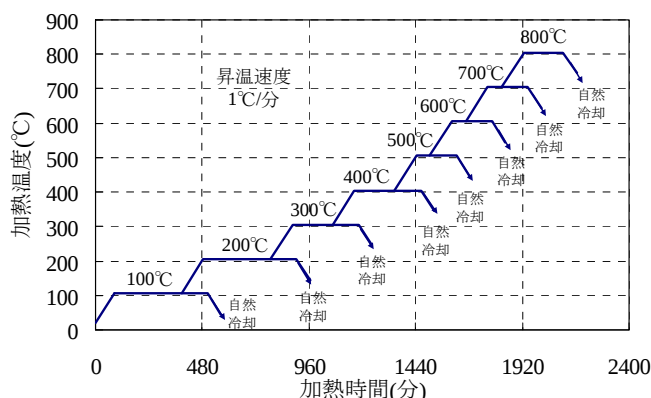


図-1 加熱スケジュール

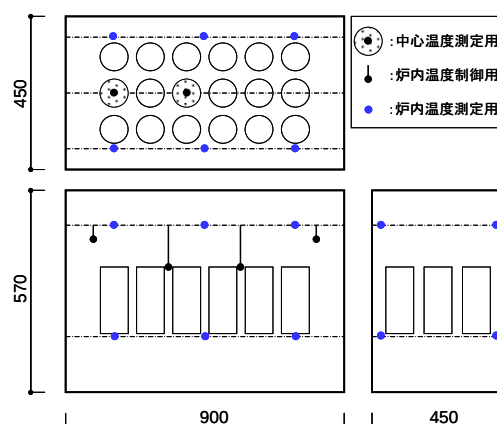


図-2 供試体および
炉内温度測定用熱電対の配置

表-6 フレッシュコンクリート試験結果

調合名	スランプフロー(cm)			50cm フロー 到達 時間 (s)	空気 量 (%)	コン クリ ート 温 度 (℃)
			Ave.			
A-1	59.5	× 58.5	59.0	5.4	2.7	18
A-2	63.0	× 62.5	62.8	4.8	2.6	18
B-1	64.0	× 63.0	63.5	4.4	2.7	21
B-2	56.0	× 56.0	56.0	5.5	2.8	20
C-1	60.5	× 58.0	59.3	5.2	2.6	20
C-2	58.5	× 58.0	58.3	5.3	2.7	20
D-1	58.0	× 57.0	57.5	5.7	3.2	19
D-2	57.0	× 56.5	56.8	6.5	3.0	20
E-1	62.0	× 61.0	61.5	5.8	2.0	16
E-2	60.0	× 58.0	59.0	6.1	2.0	16

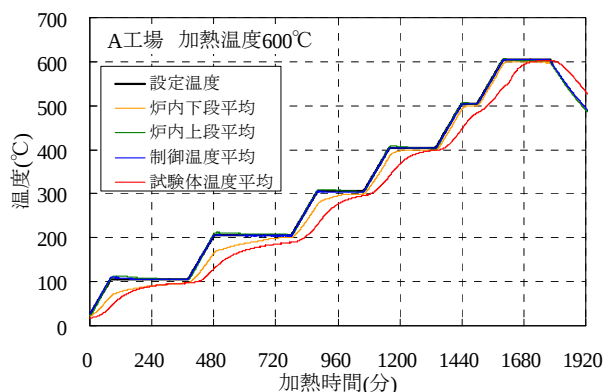


図-3 温度測定結果

結果を図-3 に示す。試験体温度は、設定温度より遅れて上昇しているが、炉内温度が目標温度に到達してから所定時間停滞させることにより、すべての温度においてほぼ目標温度に達した。

(3) 供試体外観の状況

加熱冷却後の圧縮強度試験後の供試体外観を写真-3 に示す。写真は、一例として、A 工場の常温、100、300、500、700、800℃、C 工場の 800℃の写真を示す。写真は圧縮強度試験後に撮影したものであるため、圧縮強度試験によって供試体が破壊したものはあるが、加熱のみにより爆裂した供試体はなかった。加熱温度 700℃までは、供試体に大きな変化はみられなかったが、800℃では、加熱後の気中養生開始以後、表層部の剥落が生じた。A、B 工場の供試体は、粗骨材が露出するような損傷がみられたが、C 工場の供試体は、表層部に膨れは見られたものの粗骨材の露出は確認されなかった。A、B 工場は粗骨材に石灰岩を 100%，C 工場は粗骨材に石灰岩を 50%使用しており、その影響と考えられる。

(4) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を表-7 に、圧縮強度の標準偏差を表-8 に、圧縮強度残存比（常温時の圧縮強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比）を表-9 に示す。また、加熱

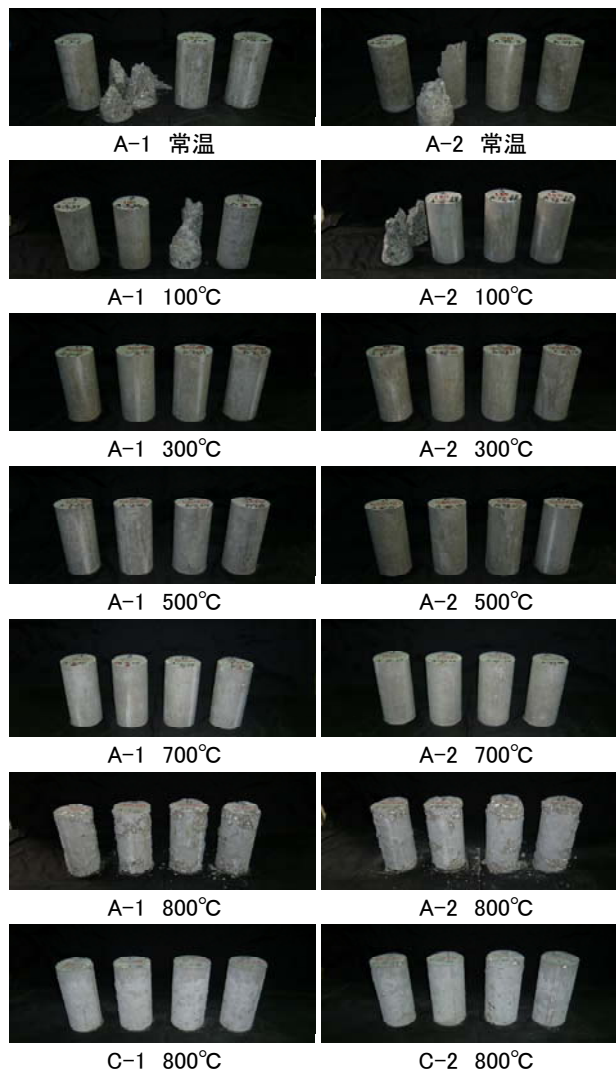


写真-3 供試体外観

表-7 圧縮強度試験結果

調合名	圧縮強度(N/mm ²)							
	常温	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
A-1	91.7	86.3	77.0	57.0	39.8	27.5	18.9	17.7
A-2	89.6	85.4	76.4	54.4	39.0	26.8	18.3	17.2
B-1	107.4	104.6	97.2	72.6	49.5	38.1	32.0	25.2
B-2	100.7	96.7	92.1	67.2	48.1	39.0	32.4	25.2
C-1	88.9	82.0	71.9	53.4	38.3	25.8	15.9	15.2
C-2	89.3	80.9	72.0	53.5	37.9	26.6	15.2	15.2
D-1	79.1	—	—	45.8	34.3	24.8	—	—
D-2	78.0	—	—	45.6	35.2	25.6	—	—
E-1	92.9	—	—	56.0	41.3	33.6	—	—
E-2	94.4	—	—	55.6	40.9	32.7	—	—

表-8 圧縮強度の標準偏差

調合名	圧縮強度の標準偏差(N/mm ²)							
	常温	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
A-1	2.42	3.78	2.90	0.74	0.70	0.61	0.48	0.41
A-2	2.98	4.07	1.72	2.85	1.03	0.88	0.38	0.86
B-1	0.83	1.81	3.83	1.21	0.73	0.93	0.32	0.33
B-2	1.93	1.61	2.93	1.49	0.83	0.78	0.51	0.76
C-1	1.23	1.50	1.48	0.61	1.47	0.84	0.48	0.81
C-2	1.03	0.41	1.14	1.61	0.49	0.84	0.37	0.19
D-1	1.25	—	—	1.29	0.54	0.51	—	—
D-2	2.10	—	—	1.21	0.51	0.94	—	—
E-1	1.48	—	—	1.88	0.99	1.12	—	—
E-2	2.70	—	—	0.88	0.84	0.92	—	—

温度と圧縮強度残存比の関係を図-4 に示す。図には日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック 2009」⁴⁾から提案されている加熱冷却後の圧縮強度残存比の値（以下、加熱冷却後 AIJ 値と略記）を併せて示す。なお、加熱温度 800℃の供試体は、写真-3 に示すように、養生期間中に徐々に崩れたため、圧縮強度試験を実施できなかった。

表-8 より、いずれの調合および加熱温度においても圧縮強度のばらつきは小さいと考えられる。また、同一工場の調合 1 と調合 2 の標準偏差を比較すると、同一加熱温度の場合、大きな差異は認められなかった。

表-9 および図-4 より、加熱温度が高くなるとすべての調合において圧縮強度残存比は低下し、加熱温度 700℃では圧縮強度残存比が 0.17～0.25 程度となった。

同一工場での調合 1 と調合 2 の圧縮強度残存比を比較すると、差の最大値が 0.03 となり、ほぼ同程度の値となった。同一工場の場合、使用材料が同じであるため、同程度の W/C では、圧縮強度残存比はほぼ同程度になると考えられる。

工場別に比較すると、B 工場がやや高く、その他の工場はほぼ同程度の値となった。ここで、セメント種類に着目すると、A 工場は中庸熱ポルトランドセメントを、B 工場は低熱ポルトランドセメントを、C, D, E 工場は普通ポルトランドセメントを使用した。加熱冷却後の圧縮強度残存比はセメント種類によって若干の差異がみられ、普通ポルトランドセメント<中庸熱ポルトランドセメント<低熱ポルトランドセメントの順に大きくなるといわれている⁵⁾ことから、低熱ポルトランドセメントを使用した B 工場の値がやや高くなったと考えられる。

加熱冷却後 AIJ 値と比較すると、すべての調合において 300～500℃で低い値を示し、一部の調合において 600℃でも低い値を示している。粗骨材に石灰岩を使用した場合、硬質砂岩を使用した場合に比べ、加熱冷却後の圧縮強度の低下が大きいといわれている⁶⁾。加熱冷却後 AIJ 値は、7 種類の粗骨材（硬質砂岩、花崗岩、石英片岩、安山岩、玄武岩、蛇紋岩、石灰岩）を使用したコンクリートの加熱冷却後のデータから設定した提案値であり、今回実験を実施したコンクリートは石灰岩を 100%（A, B, D, E 工場）または 50%（C 工場）使用している。このことから、粗骨材種類の影響で、圧縮強度残存比が加熱冷却後 AIJ 値より、低くなったと考えられる。

(5) ヤング係数測定結果

ヤング係数測定結果を表-10 に、ヤング係数の標準偏差を表-11 に、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におけるヤング係数の比）を表-12 に示す。また、加熱温度とヤング係数残存比の関係を図-5 に示す。圧縮強度と同様に、図にはヤング係数残存比の加熱冷却後 AIJ 値を併せて示す。

表-11 より、同一工場の調合 1 と調合 2 のヤング係数の

表-9 圧縮強度残存比

調合名	圧縮強度残存比							
	常温	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
A-1	1.00	0.94	0.84	0.62	0.43	0.30	0.21	0.19
A-2	1.00	0.95	0.85	0.61	0.44	0.30	0.20	0.19
B-1	1.00	0.97	0.91	0.68	0.46	0.35	0.30	0.23
B-2	1.00	0.96	0.92	0.67	0.48	0.39	0.32	0.25
C-1	1.00	0.92	0.81	0.60	0.43	0.29	0.18	0.17
C-2	1.00	0.91	0.81	0.60	0.42	0.30	0.17	0.17
D-1	1.00	—	—	0.58	0.43	0.31	—	—
D-2	1.00	—	—	0.58	0.45	0.33	—	—
E-1	1.00	—	—	0.60	0.44	0.36	—	—
E-2	1.00	—	—	0.59	0.43	0.35	—	—

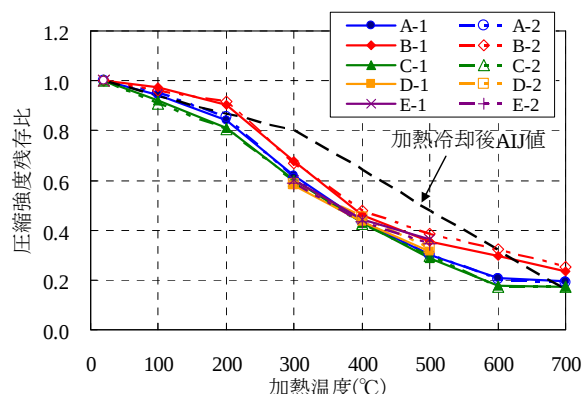


図-4 加熱温度と圧縮強度残存比の関係

表-10 ヤング係数測定結果

調合名	ヤング係数(kN/mm ²)							
	常温	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
A-1	38.6	38.6	27.1	15.5	7.3	5.0	3.6	3.7
A-2	38.7	38.0	26.6	15.3	7.2	4.9	3.5	3.9
B-1	43.2	41.0	31.9	18.4	9.2	5.8	4.0	4.6
B-2	41.5	40.1	31.2	18.2	9.3	6.0	4.5	5.0
C-1	37.6	36.6	24.1	14.2	6.7	3.6	1.7	1.6
C-2	38.3	36.9	24.6	13.8	6.3	3.6	1.5	1.5
D-1	36.4	—	—	13.2	7.6	5.1	—	—
D-2	36.5	—	—	13.3	7.6	5.2	—	—
E-1	39.9	—	—	18.1	8.6	5.9	—	—
E-2	40.3	—	—	17.4	8.1	5.9	—	—

表-11 ヤング係数の標準偏差

調合名	ヤング係数の標準偏差(kN/mm ²)							
	常温	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
A-1	0.38	0.76	0.84	0.77	0.25	0.20	0.27	0.24
A-2	1.21	1.26	0.62	0.60	0.19	0.29	0.36	0.23
B-1	0.37	0.26	1.13	0.44	0.34	0.30	0.10	0.18
B-2	1.35	0.64	1.05	0.31	0.32	0.02	0.12	0.12
C-1	0.46	0.45	0.74	0.32	0.12	0.29	0.10	0.14
C-2	0.44	0.62	1.33	0.57	0.27	0.07	0.06	0.05
D-1	0.42	—	—	0.31	0.04	0.16	—	—
D-2	0.22	—	—	0.14	0.18	0.14	—	—
E-1	0.66	—	—	0.44	0.67	0.15	—	—
E-2	0.92	—	—	0.54	0.54	0.26	—	—

標準偏差を比較すると、同一加熱温度の場合、大きな差異は認められなかった。

表-12 および図-5 より、加熱温度が高くなるとすべての調合においてヤング係数残存比は低下し、加熱温度 400℃までのヤング係数の低下が著しい。加熱温度 600, 700℃

ではヤング係数残存比が 0.04～0.12 程度となった。

同一工場での調合 1 と調合 2 のヤング係数残存比を比較すると、差の最大値が 0.02 となり、ほぼ同程度の値となった。同一工場の場合、使用材料が同じであるため、同程度の W/C では、ヤング係数残存比はほぼ同程度になると考えられる。

ヤング係数残存比は、工場が異なる場合でもほぼ同程度の値となり、セメント種類による影響はみられなかった。セメント種類は加熱によるヤング係数の低下に大きな影響を及ぼさないと一部で報告されており³⁾、それと同様の結果となった。

加熱冷却後 AIJ 値と比較すると、100℃でやや高い値を、300、400℃でやや低い値を示している。粗骨材に石灰岩を用いたコンクリートは、加熱によるヤング係数の残存率が小さいといわれて^{4),6)}おり、300、400℃ではその傾向が確認されたと考えられる。

3. 高温時における高強度コンクリートの素材実験

3.1 実験概要

(1) 実験条件および供試体

実験に供したコンクリートは、表-4 に示す B-1 (W/C=30%) と B-2 (W/C=32%) とした。供試体はφ100×200mm とし、各調合 3 体とした。なお、供試体はコンクリート打設翌日に脱型し、材齢 28 日まで標準養生、その後、温度 20℃湿度 60%で気中養生し、高温圧縮強度試験は材齢 6 ヶ月以上経過後に実施した。

(2) 予熱炉を用いた高温試験方法

既往の高温下におけるコンクリートの圧縮強度試験は、載荷装置に付設した加熱炉で供試体为目标温度まで加熱した後に圧縮強度試験を実施する。本実験では、金らの方法⁷⁾および出口らの方法⁸⁾を参考に、載荷装置の近くに設置した予熱炉で供試体为目标温度である 500℃までに加熱した後に、載荷装置に移して圧縮試験を実施した。これらの研究^{7),8)}によれば予熱炉を用いたこの圧縮試験の方法は、既往の加熱試験方法の代替方法として利用できること、また強度やヤング係数に及ぼす影響が小さいことが確認されている。

予熱炉はプログラム調節機能を有した電気炉（炉内寸法 300×400×高さ 250mm）を用いた。炉内の昇温速度は文献⁷⁾を参考に 100℃/h とし、500℃に達した後は供試体の温度が目標温度に到達するまでこの温度を維持した。電気炉内の供試体位置と温度測定位置を図-6 に示す。予熱炉では供試体 6 体と供試体の内部温度を測定するための供試体 1 体を同時に加熱した。

圧縮試験は、万能試験機を用い、JIS A 1108 により実施した。試験中の供試体は断熱保温と試験片の飛散を防止するために加熱炉を利用したが、本装置による加熱は実

表-12 ヤング係数残存比

調合名	ヤング係数残存比							
	常温	100℃	200℃	300℃	400℃	500℃	600℃	700℃
A-1	1.00	1.00	0.70	0.40	0.19	0.13	0.09	0.10
A-2	1.00	0.98	0.69	0.40	0.19	0.13	0.09	0.10
B-1	1.00	0.95	0.74	0.43	0.21	0.13	0.09	0.11
B-2	1.00	0.97	0.75	0.44	0.22	0.14	0.11	0.12
C-1	1.00	0.97	0.64	0.38	0.18	0.10	0.04	0.04
C-2	1.00	0.96	0.64	0.36	0.16	0.09	0.04	0.04
D-1	1.00	—	—	0.36	0.21	0.14	—	—
D-2	1.00	—	—	0.36	0.21	0.14	—	—
E-1	1.00	—	—	0.45	0.22	0.15	—	—
E-2	1.00	—	—	0.43	0.20	0.15	—	—

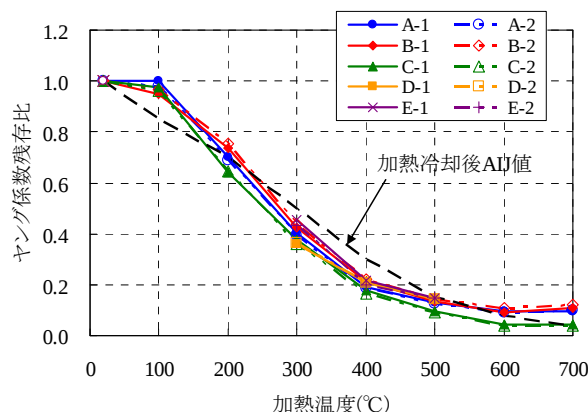


図-5 加熱温度とヤング係数残存比の関係

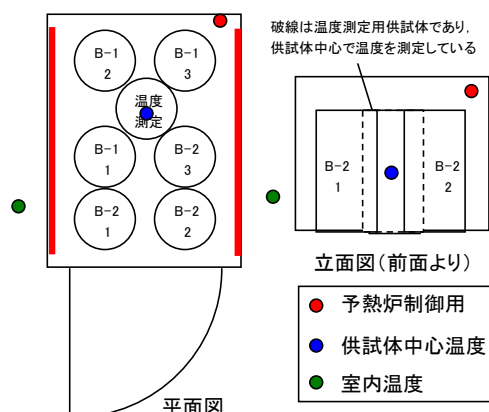


図-6 予熱炉内の供試体位置と温度測定位置

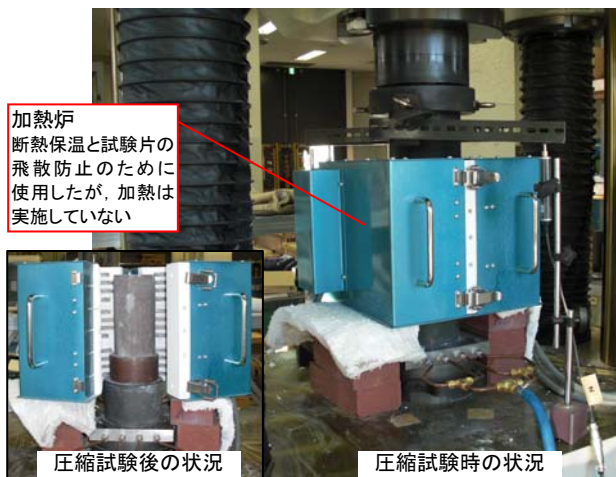


写真-4 高温圧縮試験の状況

施していない。またヤング係数は、変位計により試験機の加圧盤上下の盤間変位を計測し、この変位を供試体のひずみに換算して応力ひずみ曲線を算定して求めた。高温圧縮試験の状況を写真-4 に示す。

3.2 実験結果

(1) 加熱温度測定結果

加熱温度測定結果を図-7 に示す。供試体中心温度は、設定温度に比べて温度上昇が遅れ、500℃に達するのに約 8 時間程度を要した。また、温度測定用供試体を取り出した後の温度変化は、取出し後 5 分程度は温度変化がほとんどなく、その後緩やかに低下した。供試体の取出しから圧縮試験の開始までは、すべての供試体においてほぼ 3 分以下であったことから、圧縮試験中の供試体中心温度はほぼ 500℃程度を保持していたと推測される。

(2) 供試体外観の状況

予熱炉を用いた高温圧縮試験後の供試体外観の状況を写真-5 に示す。試験後の供試体の表層部にはひび割れがみられ、一部の供試体は爆裂が生じた。

(3) 圧縮強度試験およびヤング係数測定結果

500℃加熱時の高温時と加熱冷却後の圧縮強度およびヤング係数測定結果を表-13 に示す。圧縮強度、ヤング係数ともに B-1、B-2 に大きな差は無いが、B-1 の圧縮強度のばらつきがやや大きい結果となった。

500℃加熱時の圧縮強度残存比を図-8 に、500℃加熱時のヤング係数残存比を図-9 に示す。図には日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック 2009」⁴⁾から提案されている高温時の圧縮強度残存比またはヤング係数残存比の提案値（以下、高温時 AIJ 値と略記）、加熱冷却後 AIJ 値、加熱冷却後の素材実験で実施した 500℃の実験データを併せて示す。500℃加熱時の高温時の圧縮強度残存比は、B-1 が 0.50、B-2 が 0.53 となり、それぞれ加熱冷却後の素材実験の圧縮強度残存比 0.35 と 0.39 より大きい結果であった。なお、この結果は 500℃の高温時 AIJ 値 0.53 とほぼ同じ値であった。

一方、500℃加熱時の高温時のヤング係数残存比は、B-1 が 0.13、B-2 が 0.14 とほぼ等しい値となり、加熱冷却後の素材実験のヤング係数残存比 0.13 および 0.14 と同程度となった。また、高温時 AIJ 値 0.35 に比べて小さく、加熱冷却後 AIJ 値である 0.15 と同程度となった。さらに、高強度コンクリートの試験結果で、文献 4) の中では下限値に近い結果となっている宮本らの回帰曲線⁹⁾ (W/B=22 ~36%の範囲) に近い値であった。

4. まとめ

高温加熱した高強度コンクリートの力学的性質に関する基礎データを収集することを目的として、設計基準強

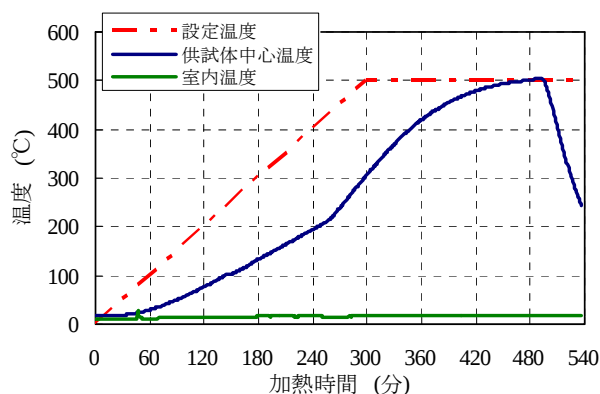


図-7 加熱温度測定結果



写真-5 供試体外観

表-13 500℃加熱時の高温時と加熱冷却後の圧縮強度およびヤング係数測定結果

調査名	実験種類	圧縮強度(N/mm ²)		ヤング係数(kN/mm ²)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
B-1	高温時	53.9	2.05	5.50	0.33
B-2	高温時	53.7	0.29	5.78	0.25
B-1	加熱冷却後	38.1	0.93	5.79	0.30
B-2	加熱冷却後	39.0	0.78	5.98	0.02

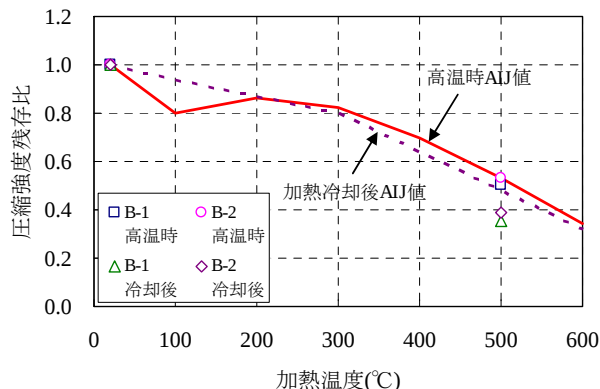


図-8 500℃加熱時の圧縮強度残存比

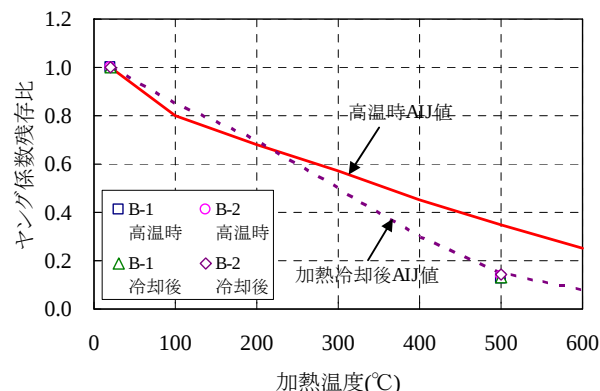


図-9 500℃加熱時のヤング係数残存比

度 60N/mm² クラスのコンクリートを対象に、加熱冷却後および予熱炉を用いた高温試験を実施した。その結果、本試験の範囲内で、以下のことが明らかとなった。

- (1) 加熱冷却後の圧縮強度残存比は、加熱温度が高くなるとすべての調合において低下し、加熱温度 700℃では、0.17～0.25 程度となった。
- (2) 加熱冷却後の圧縮強度残存比は日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック 2009」の加熱冷却後の提案値と比較すると、300～500℃で低い値を示した。
- (3) 加熱冷却後のヤング係数残存比は、加熱温度が高くなるとすべての調合において低下し、加熱温度 400℃までの低下が著しい。加熱温度 600、700℃ではヤング係数残存比が 0.04～0.12 程度となった。
- (4) 加熱冷却後のヤング係数残存比は、日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック 2009」の加熱冷却後の提案値と比較すると、100℃でやや高い値を、300、400℃でやや低い値を示した。
- (5) 加熱冷却後の圧縮強度残存比およびヤング係数残存比は、同一使用材料の場合、水セメント比が若干異なってもほぼ同程度の値となった。また、同一使用材料の同一加熱温度の場合、ばらつきに大きな差異はみられなかった。
- (6) 予熱炉を用いた高温試験の 500℃加熱時の圧縮強度残存比は、0.50 および 0.53 となり、加熱冷却後の 500℃加熱時の圧縮強度残存比 0.35 および 0.39 より大きい値となった。
- (7) 予熱炉を用いた高温試験の 500℃加熱時の圧縮強度残存比は、日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック 2009」の高温時の提案値 0.53 とほぼ同程度であった。
- (8) 予熱炉を用いた高温試験の 500℃加熱時のヤング係数残存比は、0.13 および 0.14 となり、加熱冷却後の 500℃加熱時のヤング係数残存比 0.13 および 0.14 と同程度の値となった。
- (9) 予熱炉を用いた高温試験の 500℃加熱時のヤング係数残存比は、日本建築学会「構造材料の耐火性ガイドブック 2009」の高温時の提案値 0.35 より小さく、加熱冷却後の提案値 0.15 と同程度の値となった。
- (10) 予熱炉を用いた高温試験の圧縮強度残存比およびヤング係数残存比は、同一使用材料の場合、水セメント比が若干異なってもほぼ同程度の値となった。

本研究では、コンクリートの粗骨材種類を石灰岩 100%または石灰岩 50%の使用割合とした。また、強度は Fc60N/mm² クラスのみとした。高温加熱した高強度コンクリートの力学的性質には、粗骨材種類や強度が影響すると言われているため、これらを変化させた場合の性質を把握することも重要であると考えられる。

謝辞

本研究は、前田建設工業と、戸田建設、西松建設、ハザマ、フジタの共同研究成果の一部である。多大なご協力をいただいた関係各位の皆様および実験にご協力いただいた関係各社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 松戸正士，西田浩和，大塚貴弘，平島岳夫，安部武雄：高温加熱時における高強度コンクリートの力学的特性について 高強度コンクリートの耐火性に関する研究（その 1），日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.624，pp.341-347，2008.2
- 2) 松戸正士，西田浩和，片寄哲務，安部武雄：高温加熱後の超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，No.603，pp.171-177，2006.5
- 3) 森田武，西田朗，山崎康行：高強度コンクリート（圧縮強度 120N/mm²）の加熱後の残存強度特性，平成 12 年度日本火災学会研究発表会概要集，pp.338-341，2000.5
- 4) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック 2009，pp.34-112，2009.3 p.54，p.55
- 5) 一瀬賢一，川口徹，長尾覚博，河辺伸二：高温加熱後の高強度コンクリートの力学的性質に及ぼすセメントの影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），A-1，pp.727-728，2003.9
- 6) 一瀬賢一，川口徹，長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートにおける粗骨材の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.285-290，2002
- 7) 金亨俊，濱崎仁，野口貴文，長井宏憲：予熱炉を用いた高温加熱下におけるポリマーセメントモルタルの力学性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1631-1636，2010
- 8) 出口嘉一，三井健郎：予熱したコンクリートを用いた高温圧縮試験方法の提案と結果，日本火災学会論文集，Vol.59，No.1，pp.17-23，2009
- 9) 宮本圭一，安部武雄：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研究，日本建築学会構造系論文集，No.574，pp.227-234，2003.12