

論文 超高強度コンクリートの構造体強度と高温加熱後の力学的性質

西田 浩和^{*1}・横須賀誠一^{*2}・松戸 正士^{*3}・片寄 哲務^{*4}

要旨：設計基準強度が 120N/mm² 級の超高強度コンクリートの実用化のため、試設計に基づく実大模擬柱の充填施工実験に加え、供試体レベルの高温加熱実験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。(1)市中の生コン工場において 120N/mm² 級の超高強度コンクリートを製造できた。(2)実大模擬柱充填施工実験からは所要構造体強度の確保が実証された。(3)高温加熱を受けると圧縮強度およびヤング係数はともに加熱温度が上昇するほど大きく低下した。(4)高温加熱後の供試体に水分供給を行うことにより、ヤング係数は若干回復するものの、圧縮強度の回復は困難であった。

キーワード：高強度コンクリート、構造体コンクリート、圧縮強度、高温加熱

1. はじめに

近年、設計基準強度(Fc)が 60~100N/mm² の高強度コンクリートを用いた 30 階を超える高層 RC 造建築物が建設されるようになった。さらに、Fc=100N/mm² を超える超高強度コンクリートについては、多くの研究報告がなされており、これから実用化に移行する段階である。今後もその需要は引き続き維持されるものと考えられる。

また、高強度コンクリートを用いた建築物においては、万一火災を受けた場合の劣化診断を行ううえで、高温加熱後の力学的性質の把握は重要である。これに関する研究報告^{1),2),3),4),5)}は増えつつあるもののデータ数はまだ少ない。

本論文は、Fc=120N/mm² 級の超高強度コンクリートの実用化を目指し、現場適用に際する施工品質の確認と、高温加熱後の力学的性質の把握を目的とした。すなわち、Fc=120N/mm² 級のコンクリートについて、市中の生コン工場で製造し、試設計の結果に基づく寸法・配筋に則した模擬柱に打設し、施工性・充填性・構造体強度の確認をした。また、同時に作製した供試体を用いて高温加熱(100~800℃)した後、常温まで冷却してからの圧縮強度試験(冷間試験)を行い、

加熱劣化性状および劣化回復方法について実験的に検討・考察した。

2. 実大模擬柱充填施工実験⁶⁾

2.1 使用材料および調査

使用材料を表-1に、調査を表-2に示す。結合材(B)は、低熱ポルトランドセメントと粉体シリカフューム(結合材質量の内割りで10%混

表-1 使用材料

セメント (C)	低熱ポルトランドセメント (密度 3.22g/cm ³ , B=C+SF)
細骨材 (S1)	市原産山砂 (表乾密度 2.57 g/cm ³ , 吸水率 3.02%)
細骨材 (S2)	相模川水系陸砂 (表乾密度 2.60 g/cm ³ , 吸水率 2.96%)
粗骨材 (G)	青梅産碎石 硬質砂岩 (表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 0.63%)
混和材 (SF)	粉体シリカフューム (密度 2.20 g/cm ³)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系, 密度 1.08 g/cm ³)

表-2 コンクリートの調査

水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤使用量 (B×%)
	W	C	S1	S2	G	SF	
16	160	900	136	317	848	100	1.50

*1 (株)フジタ 技術センター 建築研究部 主任研究員 工修 (正会員)

*2 (株)フジタ 建築本部 建築統括部 主席コンサルタント (正会員)

*3 (株)フジタ 技術センター 建築研究部 主任研究員 工修

*4 (株)フジタ 技術センター 建築研究部 工修

入)を用いた。目標スランプフローは65cm(許容差±7.5cm)、目標空気量は2%(許容差±1%)とした。フレッシュコンクリートの試験項目は、スランプフロー(50cmフロー到達時間含む)、空気量およびコンクリート温度とした。

2.2 実験方法

練混ぜは、容量3.0m³の水平二軸強制練りミキサを用い、1バッチに1.5m³ずつ練り混ぜた。練混ぜ方法は、モルタルを3分間練った後、粗骨材を投入して2分間練り混ぜるモルタル先練り方式とした。トラックアジテータは合計4.5m³を積載し、実験場所まで約30分で輸送した。

実験場所に到着したコンクリートは、フレッシュコンクリートの試験を行い、**図-1**に示す高さ2.3mの有筋試験体を打設するとともに、**図-2**に示す上下を断熱した無筋試験体(1000×1000×1000)も打設した。また、同時に標準養生供試体および**図-3**に示す簡易断熱養生供試体を採取した。温度計測は、有筋・無筋試験体中心部および表面部、簡易断熱養生供試体中心部に加え、試験体からの放熱を確認するために試験体上部から突出している芯筋上下の温度履歴についても材齢7日まで行った。

圧縮強度(ヤング係数も含む)試験は、コア供試体、標準養生供試体、簡易断熱養生供試体を用いて行った。有筋試験体の材齢91日用コア供試体は、コア側面(切断面)における最小径5mm以上の骨材を粗骨材とし、粗骨材面積をコア側面積で除して粗骨材面積率を算出した。

有筋試験体の水平方向のコアは、コンクリート表面から芯筋のフープ筋にビット刃先が届くまでとし、上中下3本ずつ採取した。鉛直方向のコアは、芯筋の内部と外部から1本ずつ採取した。鉛直方向の供試体は、高さ2,300mmのコアより水平方向から採取した供試体高さ位置にほぼ対応するように、上中下3本ずつ採取した。

コンクリートの打込みは、バケツ(容量0.5m³)を用いて、試験体上部からの落とし込みとした。コンクリートの締め固めは、1回の打込み層の厚さを約50cmとし、層毎に材料分離が生

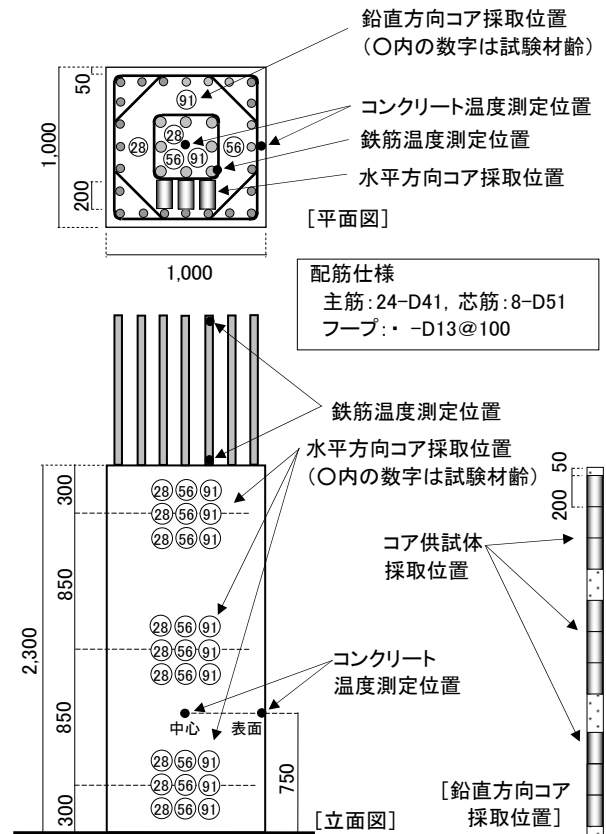


図-1 有筋試験体

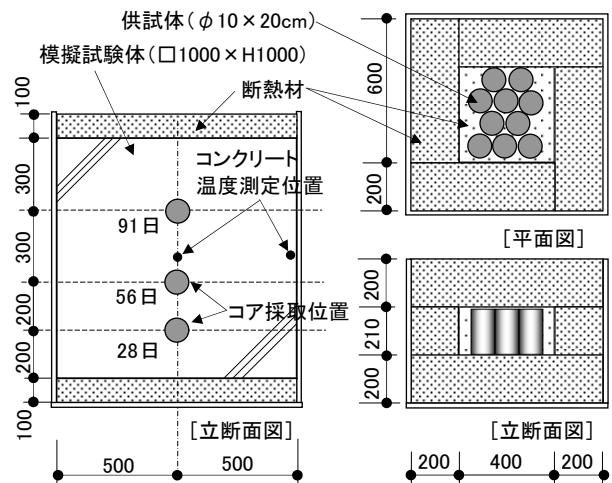


図-2 無筋試験体 図-3 簡易断熱養生方法

じない程度(10~15秒間)にバイブレータを用いて締め固め、下部は叩きも行った。

2.3 実験結果

(1)フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を**表-3**に示す。荷卸し時におけるスランプフロー試験結果はやや大きめであったが、目視によって分離傾向は認められず、所定品質を満足した。

有筋試験体の打設状況を写真-1に示す。過密配筋にもかかわらず、型枠取外し後のコンクリートには表面気泡も認められず、良好な充填度合と仕上がり状態が確認できた。

(2) 温度履歴

温度履歴の計測結果を図-4に示す。有筋試験体および無筋試験体中心部は、打込み後約30時間程度で最高温度に達した。両者の最高温度差8.9℃からは、突出鉄筋によってコンクリートの水和熱が放熱したことがうかがえる。

(3) 強度発現性状

圧縮強度発現性状を図-5、圧縮強度とヤング係数（強度の1/3応力時セカントモデュラス）の関係を図-6、有筋試験体の高さ方向の強度分布を図-7に示す。図-5のコアの凡例は、原則として、模擬柱種別-（鉛直コア採取位置）-コア採取方向-コア採取高さの順に示す。

調査強度・構造体強度共に管理材齢を91日に設定すれば、本調査で $F_c=120\text{N/mm}^2$ をほぼ確保できると思われる。ヤング係数は、日本建築学

会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説1999」の推定式（以下、RC規準式）に比べるとやや下回った。高さ方向の分布では、有筋試験体上部のコア強度がやや低い傾向にあった。

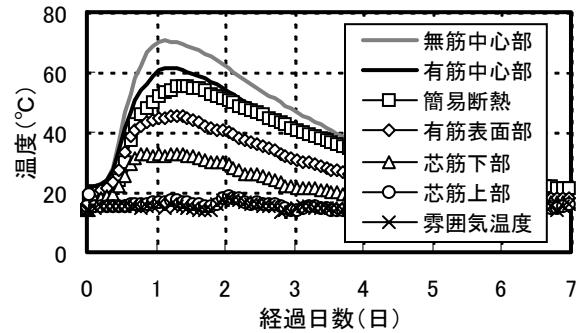


図-4 温度履歴

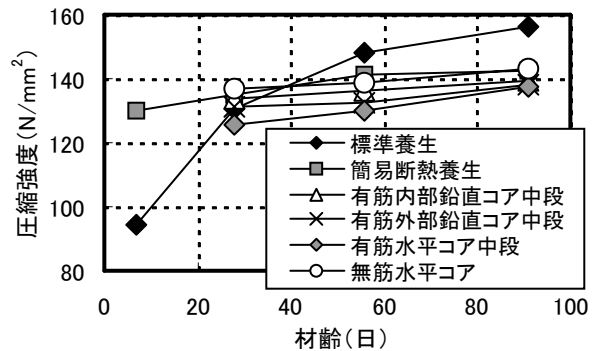


図-5 圧縮強度発現性状

表-3 フレッシュコンクリートの性状

試験場所	スランブ フロー(cm)	50cmフロ ー到達 時間(s)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
出荷時	76.5	5.2	2.0	21.0
荷卸し時	72.5	5.8	2.2	20.8

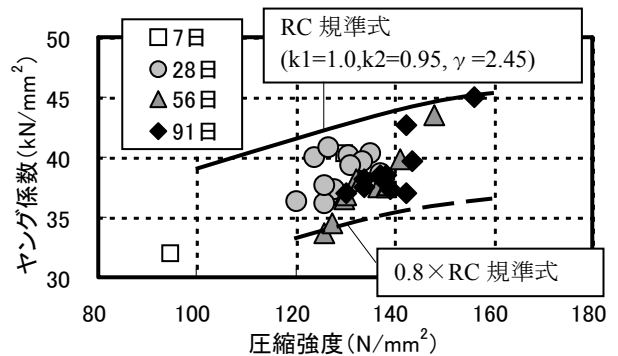


図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

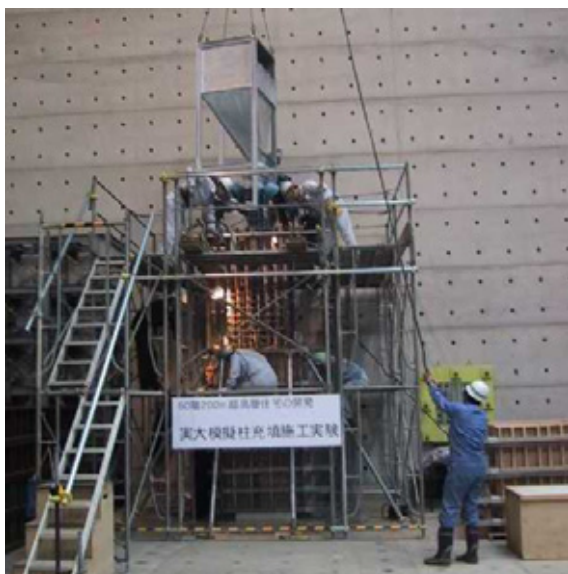


写真-1 実大模擬柱打設状況

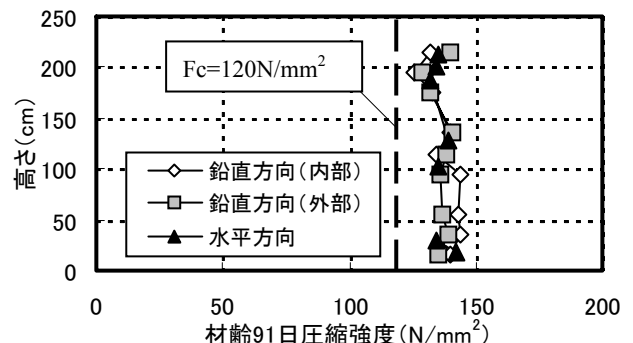


図-7 コア圧縮強度分布

(4) 粗骨材面積率

有筋試験体の粗骨材面積率測定結果を図-8に示す。柱最上部の粗骨材面積率だけやや小さくなる傾向にあったものの、その他の粗骨材面積率は概ね30~35%の範囲であった。

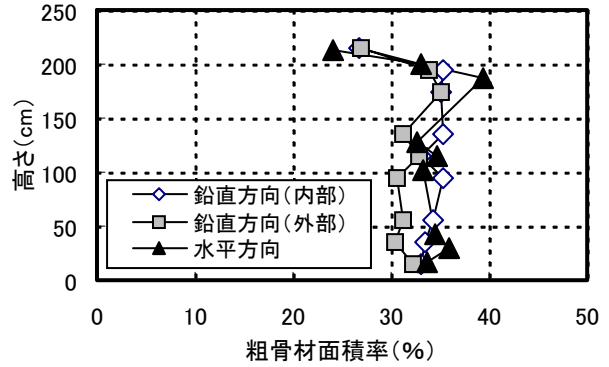


図-8 粗骨材面積率分布

3. 高温加熱後の力学的性質

3.1 使用材料および調合

使用材料および調合は、「2.1 使用材料および調合」と同様のものを用いた。

3.2 実験方法

(1) 実験条件

実験条件は、表-4に示すように加熱温度9水準、供試体形状2水準、高温加熱後の養生方法2水準、高温加熱後の養生材齢4水準とした。測定項目は、圧縮強度とヤング係数（強度の1/3応力時セカントモデュラス）とした。ヤング係数は、コンプレッソメータを用いて JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して測定した。

表-4 実験条件

項目	摘要	水準数
加熱温度	20℃(常温), 100℃, 200℃, 300℃, 400℃, 500℃, 600℃, 700℃, 800℃	9
供試体形状	φ10×20cm, φ7.5×15cm	2
高温加熱後の養生方法	標準養生(常温降下時点から), 気中養生(20℃, 60%)	2
高温加熱後の養生材齢	1日, 1ヶ月, 3ヶ月, 6ヶ月*	4

* φ10×20cmのみ

各供試体は、打設後約48時間で脱型し、高温加熱を与える材齢6ヶ月まで標準養生とした。これは、一連の実験が長期にわたるため、材齢の違いによる供試体間の強度差が少なくなるように考慮して、6ヶ月の長期材齢で高温加熱実験を実施した。

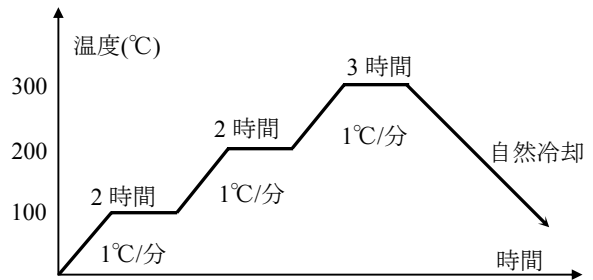


図-9 基本加熱スケジュール (300℃の場合)

(2) 加熱条件

加熱は、プログラム調節機能を有した電気炉によった。事前のキャリブレーションにより、供試体中心部の温度が目標温度(±10℃)となるように、加熱速度は1℃/分、100℃毎に供試体内部の温度が安定するまでの停滞時間(1~3時間)および目標温度に到達してからの停滞時間(2~4時間)を設けた。その一例として、300℃の場合の基本加熱スケジュールを図-9に、それぞれの加熱温度における各停滞時間を表-5に示す。降温は、自然冷却とし、供試体は温度が30℃程度に下がるまで放置してから加熱直後の試験に供した。

表-5 停滞時間

温度	100℃	300℃	500℃
停滞時間	200℃	400℃	以上
100℃毎の停滞時間	3時間	2時間	1時間
目標温度停滞時間	4時間	3時間	2時間

3.3 実験結果

(1) 目視観察

加熱直後の供試体表面を目視観察したところ、加熱温度200℃以下では0.05mm以下、400℃では0.08mm、600℃では0.3mm、800℃では0.7mm程度の亀甲状のひび割れが確認された。

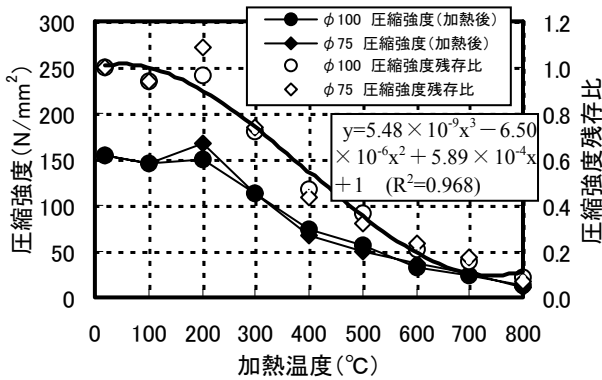


図-10 加熱温度と圧縮強度の関係

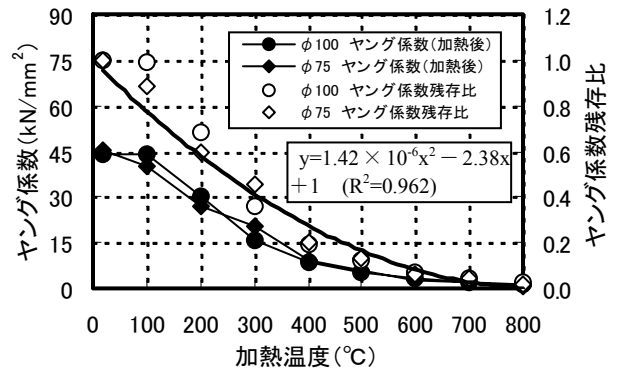


図-13 加熱温度とヤング係数の関係

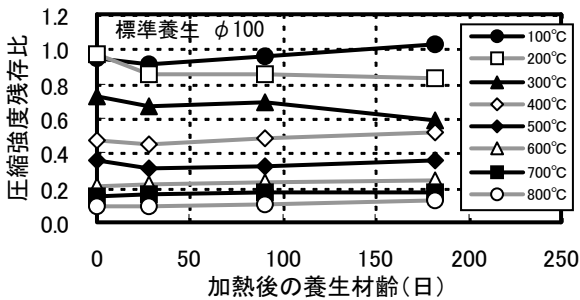


図-11 養生材齢と圧縮強度残存比（標準）

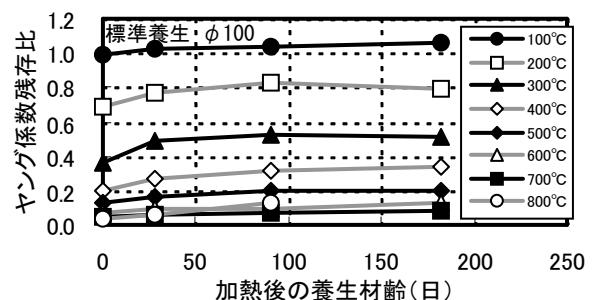


図-14 養生材齢とヤング係数残存比（標準）

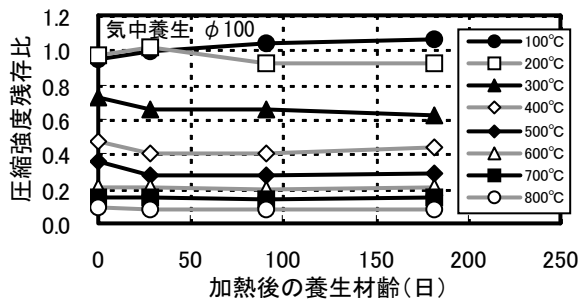


図-12 養生材齢と圧縮強度残存比（気中）

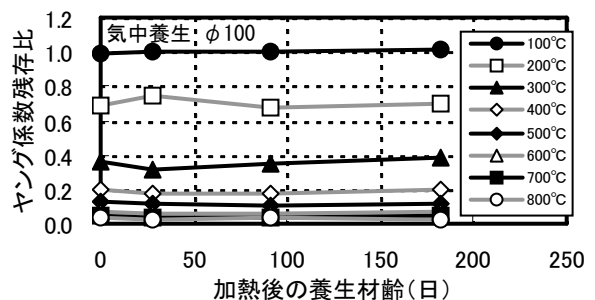


図-15 養生材齢とヤング係数残存比（気中）

(2) 圧縮強度

加熱直後における加熱温度と圧縮強度および圧縮強度残存比（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）の関係を図-10に、加熱後の養生材齢と圧縮強度残存比の関係を養生条件毎に図-11、図-12に示す。

加熱温度が200°Cまでは常温と同程度の強度を示し（高温蒸気と未水和セメントの水和促進作用によるものと考えられる）、200°Cを超えると強度低下を示した。圧縮強度残存比は、200°Cまでは0.94~1.08を確保したが、200°C以降は加熱温度の上昇に伴って低下し、800°Cでは常温時の10%以下まで低下した。供試体形状の違いによる顕著な差はなかった。加熱後の標準養生に

より、圧縮強度残存比は8%程度回復するものがある一方、14%程度低下するものもあるため、一概に加熱後の水分供給により圧縮強度が回復する可能性は高いとは言えない。

(3) ヤング係数

加熱直後における加熱温度とヤング係数およびヤング係数残存比の関係を図-13に、加熱後の養生材齢とヤング係数残存比の関係を養生条件毎に図-14、図-15に示す。

圧縮強度と同様、ヤング係数は加熱温度の上昇に伴って低下することが確認された。その低下は加熱温度が100°Cから認められ、300°Cで常温時の50%以下、800°Cでは常温時の5%以下まで低下した。また、加熱後に気中養生したもの

はヤング係数の回復傾向がほとんどないのに対して、加熱後の標準養生により、ヤング係数残存比は4～15%程度の回復が認められた。

(4) 応力-ひずみ関係

加熱直後およびその後の標準養生6ヶ月後の応力-ひずみ曲線（加熱温度毎に供試体数2～3体の平均値）を図-16、図-17に示す。

加熱直後の応力-ひずみ曲線からは、加熱温度が300℃を超えると载荷初期のひずみが大きいS字型の曲線を示している。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。

高温加熱後に標準養生した供試体の応力-ひずみ曲線は、加熱直後と同様、300℃を超えると強度の回復はほとんど認められないが、100℃と200℃の勾配差がほとんどなくなった。また、最大強度時のひずみが減少傾向にあった。すなわち、加熱後の標準養生によって曲線の勾配が急になっており、ヤング係数の回復を示している。

4. まとめ

設計基準強度(F_c)が 120N/mm^2 級の高強度コンクリートを市中の生コン工場で製造し、実大模擬柱の充填施工実験および供試体レベルの高温加熱実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)市中の生コン工場において、 $F_c=120\text{N/mm}^2$ 級の超高強度コンクリートを製造できた。
- (2)コア強度試験結果より、低熱ポルトランドセメントおよびシリカフェームを結合材とし、硬質砂岩の粗骨材を用いることで、水結合材比16%で $F_c=120\text{N/mm}^2$ をほぼ確保できた。
- (3)水結合材比16%の高強度コンクリートは、高温加熱を受けると圧縮強度およびヤング係数ともに加熱温度が上昇するほど大きく低下した。
- (4)高温加熱後の水分供給により、ヤング係数は若干回復するものの、圧縮強度の回復は困難であった。

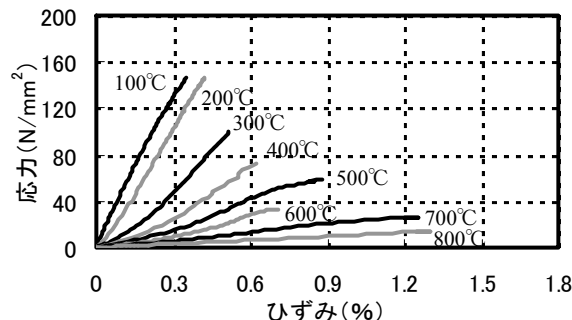


図-16 応力-ひずみ曲線（加熱直後）

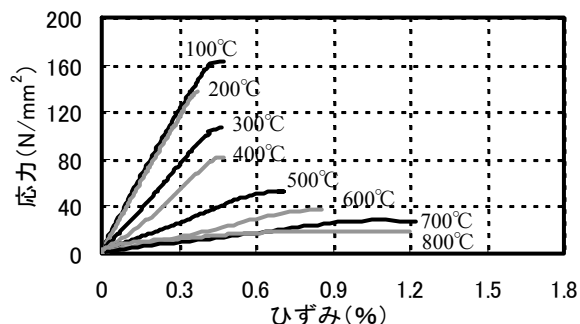


図-17 応力-ひずみ曲線（標準養生：6ヶ月）

参考文献

- 1) 一瀬賢一ほか：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，第515号，pp.163-168，1999.1
- 3) 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.353-358，2003.7
- 4) 土井文好ほか：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) 宮本圭一ほか：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研究，日本建築学会構造系論文集，第574号，pp.227-234，2003.12
- 6) 西田浩和ほか：超高強度コンクリートの実大模擬柱充填施工実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.1001-1002，2003.9