

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研究(その2)

各種強度特性の検討

一 瀬 賢 一 川 口 徹
長 尾 寛 博

Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High Temperature Heating (Part2)

Study on Various Strength Properties of Concrete

Ken-ichi Ichise Toru Kawaguchi
Kakuhiro Nagao

Abstract

Research has been conducted to determine the mechanical properties of high-strength concrete under high temperatures to evaluate the safety of reinforced concrete after a fire. This paper also examines the explosive prevention effect of polypropylene (PP) fiber-mixed concrete. The following conclusions were obtained.

(1) The compressive strength of concrete with 25 - 50 % of water binder (W/B) declined at temperatures over 200 , and at 600 , it dropped to 30% - 40 % of its normal strength. (2) The bending strength and tensile strength of high-strength concrete dropped in a similar manner. (3) PP fiber non-mixed concrete with W/B=20% exploded at a temperature of 400 . However, PP fiber mixed concrete remained stable up to 600 .

概 要

火災を受けた超高層RC造の安全性を評価するための基礎データとして、高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的特性に関する実験を行った。またポリプロピレン(PP)繊維混入コンクリートの爆裂防止効果についても検討した。その結果、以下のことがわかった。

(1)水結合材比(W/B)25~50%のコンクリートの圧縮強度は、200 以上では加熱温度が高くなるほど低下し、加熱温度600 では常温強度の30~40%になる。(2)コンクリートの曲げ強度、引張強度は、圧縮強度と同じように加熱温度が高くなるほど低下する。(3)PP繊維未混入の場合、W/B20%のコンクリートは、加熱温度400 で爆裂を生じた。しかしPP繊維混入の場合は、加熱温度600 まで爆裂しなかった。

1. はじめに

近年設計基準強度(以下 F_c とする)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)が多数設計・施工されてきている。RC造は、通常耐火構造として認められているが、 F_c 80N/mm²を超える高強度コンクリートを使用する場合、火災時の爆裂による耐力低下が懸念され、解析的検討を必要とする場合が生じる。このため高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質の把握は、解析精度を向上させる上できわめて重要である。しかし、高温加熱を受けた高強度コンクリートのデータは、この数年間で研究報告が増えてはいるものの、まだ十分とは言えない^{1),2)}。また圧縮強度以外の力学的性質については、ほとんど報告されていない。

この報告は、火災を受けた超高層RC構造物の安全性を評価するための基礎データとして、高温加熱を受けた高強度コンクリートの各種強度、ヤング係数を測定し、検討・考察した。また高強度コンクリートの爆裂防止効果が認められているポリプロピレン繊維(以下PP繊維)

混入コンクリートについても併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験条件は、Table 1に示す水結合材比(W/B)5水準、加熱温度(常温20 を含む)7水準、ポリプロピレン繊維(PP繊維)混入の有無2水準とした。

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、細骨材に木更津産丘砂(密度:2.60g/cm³)、粗骨材として青梅産砕石(硬質砂岩、密度:2.65g/cm³)を使用した。W/B=20%は、混和材にノルウェー産シリカフェーム(以下SF、密度:2.22g/cm³、比表面積:19.65m²/g、平均粒径:0.15 μ m)を使用した。SFは、セメント質量の内割り10%混入とした。またW/B=20%の調合は、PP繊維混入の有無の影響を比較した。PP繊維は、S社製、直径18 μ m、長さ10mm(密度:0.9g/cm³、ヤング係数:1.47~3.43 $\times 10^3$ N/mm²)

を使用した。混和剤は、W/B=50%に対してオキシカルボン酸塩を主成分とするAE減水剤、W/B=20~40%に対して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。

調査条件は、W/B=50%では目標スランプを 21 ± 2.5 cm、W/B=20~40%については、目標スランプフロー値を 55 ± 10 cmとした。目標空気量は、W/B=50%では 4.0 ± 1.0 %とし、W/B=20~40%では 2.5 ± 1.0 %とした。各コンクリートの調査をTable 2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、外観観察、動弾性係数、各種強度(圧縮、引張、曲げ)およびヤング係数とした。各測定はJISに準じて実施した。外観観察を目視により行った。供試体は、圧縮および引張強度には 100×200 mm、曲げ強度には $100 \times 100 \times 400$ mmを用いた。供試体の本数は、各実験条件に対して3体を一組とした。

2.4 コンクリートの打設と養生

コンクリートは、容量100ℓの強制練りミキサを使用し、各調査3バッチ(各80ℓ)混練した。打設後は、 20 ± 3 、 80 ± 5 %R.H.の恒温恒湿室内で湿潤養生とし、翌日封かん養生を行い材齢56日まで 20 ± 3 、 60 ± 5 %R.H.の恒温恒湿室内で養生した。

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。加熱実験は、材齢56日から実施した。加熱速度は、既往の加熱後冷却常温載荷試験(以下冷間試験)を参考とし、供試体の内外温度差を小さくし、熱応力の影響を小さくするため100 /hrとした。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 程度に下が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。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状は、W/B=20%の調査を除けば、目標のスランプ、スランプフロー、空気量を有するコンクリートを得ることができた。W/B=20%の2調査は、目標スランプフローを満足できなかった。しかし、ワーカビリティは良好なため、混和剤で無理にスランプフローを延ばすことなく、このまま供試体に使用した。

3.2 外観観察

加熱温度400 以上では0.05mmを超えるひび割れが供試体表面に目立ちはじめ、加熱温度600 では供試体の全面にわたり亀甲状のひび割れが生じた。また、加熱温度が高いほどひび割れ幅も大きく、加熱温度600 では0.2mmを超えるものも多数発生した。

Table 1 実験条件
Test Conditions

項目	摘要	水準数
水結合材比	20%, 25%, 30%, 40%, 50%	5
加熱温度	20 (常温), 100, 200, 300, 400, 500, 600	7
ポリプロピレン繊維混入の有無	有り, 無し	2

Table 2 コンクリートの調査
Concrete Mixing Proportion

No.	W/B (%)	記号	単位置 (kg/m ³)						混和剤対量(%)
			W	C	SF	S	G	PP	
1	20	PP-20	170	765	85	611	767	0.9	C×3.0%
2	20	N-20	170	765	85	611	767	0	C×2.8%
3	25	N-25	170	680	0	683	863	0	C×2.0%
4	30	N-30	170	567	0	729	914	0	C×1.4%
5	40	N-40	170	427	0	780	975	0	C×1.0%
6	50	N-50	170	341	0	838	961	0	C×1.0%*

* : AE 減水剤使用。他は、高性能 AE 減水剤使用

N-20供試体は、加熱温度400 で圧縮強度用の2体を除いて爆裂した。このため加熱温度500 と600 用に準備した供試体を加熱温度150 と350 に変更して実験を行った。一方PP-20供試体は、400 以上の加熱でも表層部にひび割れやわずかな損傷が生じるものの爆裂まで至らなかった。PP繊維を体積比でわずか0.1%混入することで、高強度コンクリートの爆裂を防止できることを確認した。実際の火災とは、加熱速度が大きく異なるものの、PP繊維の混入は、爆裂防止効果を十分期待できることがわかった。

3.3 圧縮強度

加熱温度と圧縮強度の関係をFig. 1に示す。加熱温度100, 200 では、文献(1)と同様に水結合材比の小さいものほど常温よりも高い圧縮強度を示した。また加熱温度300 では常温時と同程度または若干低い強度を示し、300 を超えると強度低下を示した。加熱温度600 の場合は、爆裂したN-20供試体とPP-20供試体を除けば水結合材比の小さいほうが高い圧縮強度を示した。

加熱温度と圧縮強度残存比の関係をFig. 2に示す。(ここで圧縮強度残存比は、常温の強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比として表した。以下同様に、残存比は常温時の値に対する比で表す。また加熱温度200 以上について各残存比との相関性も図示した。) 圧縮強度残存比は、加熱温度100, 200 では、1.0~1.2を確保した。加熱温度200 以上では、加熱温度の上昇に伴い低下し、図中に示すように相関性も高い(相関係数:r=0.961)。高強度コンクリートは、普通強度コンクリートと同等以上の圧縮強度残存比を残し、600 加熱後でも常温時の30~40%の圧縮強度を残存できることがわかった。

3.4 曲げ強度

加熱温度と曲げ強度および曲げ強度残存比の関係をFig. 3, Fig. 4に示す。曲げ強度は、常温から加熱温度

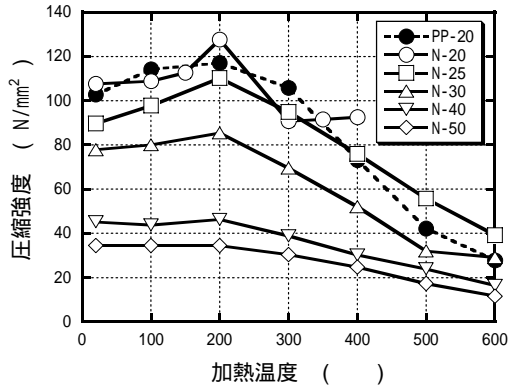


Fig. 1 圧縮強度
Compressive Strength

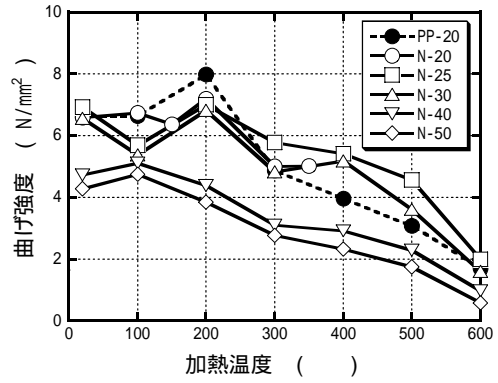


Fig. 3 曲げ強度
Bending Strength

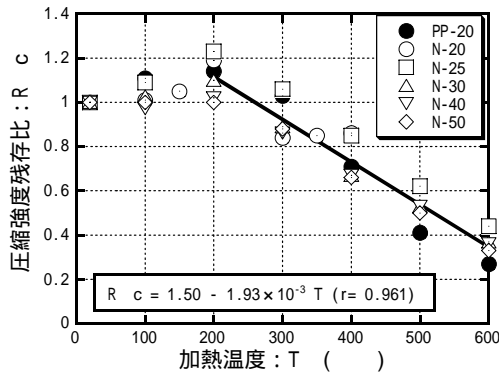


Fig. 2 圧縮強度残存比
Retained Ratio of Compressive Strength

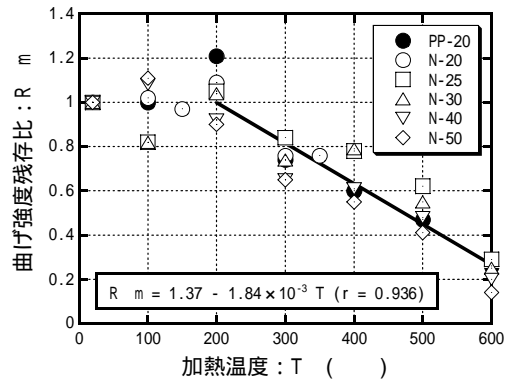


Fig. 4 曲げ強度残存比
Retained Ratio of Bending Strength

200 までの挙動が普通強度のコンクリートと高強度コンクリートと異なった。この原因は、コンクリート中の水分移動による不均一化、水和の進行による強度増加、水分の乾燥による微細ひび割れの発生などの影響が複雑に絡み合ったためによるものと推察する。加熱温度200以上では、圧縮強度残存比の場合と同様に、加熱温度の上昇に伴い曲げ強度残存比は低下した。曲げ強度残存比と加熱温度の相関性は、圧縮強度残存比と同様に高いことがわかった。

加熱温度600 では、N-20供試体とPP-20供試体を除けば、圧縮強度の結果と同様、水結合材比の小さいものほど高い曲げ強度を残し、常温時の15~30%の曲げ強度を残存することがわかった。

3.5 引張強度

加熱温度と引張強度および引張強度残存比の関係を Fig. 5, Fig. 6に示す。引張強度の場合もN-20供試体とPP-20供試体を除くと、水結合材比の小さいものほど大きく、加熱温度の上昇に伴って低下した。また引張強度残存比と加熱温度との相関性も、他の残存比と同様に高いことがわかった。N-20供試体は、常温時に比べて加熱温度100 と150 の引張強度が1.1N/mm²大きくなり、加熱温度200 で大きく低下した。加熱温度200 ~350 では同等の引張強度を維持し、加熱温度400 では爆裂した。PP-20の引張強度は、加熱温度100 でわずかに大

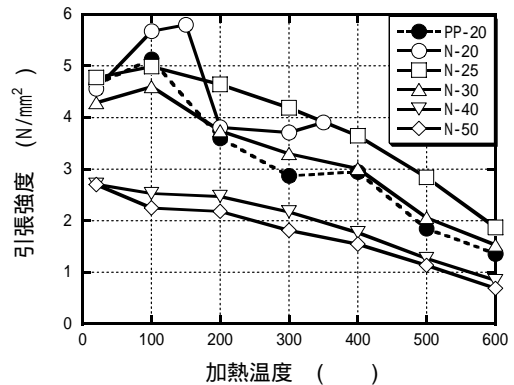


Fig. 5 引張強度
Tensile Strength

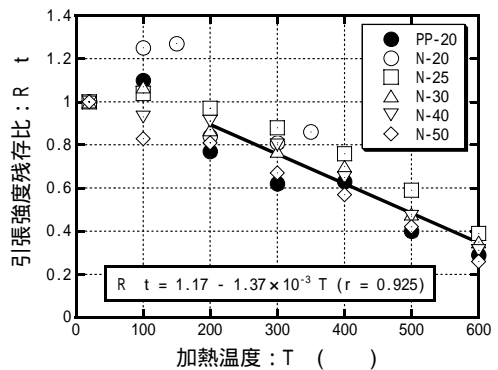


Fig. 6 引張強度残存比
Retained Ratio of Tensile Strength

きくなるものの、加熱温度200 で大きく低下し、以降加熱温度の上昇に伴い低下した。また加熱温度600 でも常温時の25~35%の引張強度を残すことがわかった。

3.6 ヤング係数

加熱温度とヤング係数残存比の関係をFig. 7に示す。ヤング係数残存比は、水結合材比の小さい方が若干大きい傾向を示した。また加熱温度に対し相関性も高く、常温から600 まで直線的に低下した。また600 加熱後は、水結合材比に関係なく0.1以下まで低下した。

4. 実験結果の評価

圧縮強度と曲げ強度、圧縮強度と引張強度との関係をそれぞれFig. 8, Fig. 9に示す。加熱後の供試体においても各強度間の相関性があり、圧縮強度から曲げ強度および引張強度のおおよその推定ができる。

加熱温度と各種強度残存比の相関性は、加熱温度200 以上ではFig. 2, Fig. 4およびFig. 6のように高い。このため常温時の各種強度に基づき、加熱試験を行わなくても加熱後の各種強度を概ね推定できる。またFig. 8 およびFig. 9の関係をを使うと、常温時の圧縮強度から加熱後の曲げ強度、引張強度をおおよそ推定可能となる。

加熱後のヤング係数も、常温時のヤング係数からFig. 7 の関係を使うことで、おおよそ推定できる。また日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」のヤング係数の式と合わせれば、常温時の圧縮強度の結果から加熱後のヤング係数の推定も可能となる。

5. おわりに

今回の実験の結果、以下のことがわかった。

- (1)高温加熱を受けた水結合材比25~50%のコンクリートの圧縮強度は、加熱温度200 以上では高くなるほど低下し、600 加熱後では常温強度の30~40%になる。
- (2) 高温加熱を受けたコンクリートの曲げ強度、引張強度も圧縮強度と同じように温度が高くなるほど低下する。低下する割合は、圧縮強度の場合よりやや大きい傾向が認められる。
- (3) 高温を受けたコンクリートのヤング係数は、加熱温度が高くなるほど低下する。600 加熱後では、常温時の10%まで低下する。
- (4) PP繊維未混入の場合、水結合材比25~50%のコンクリートは、600 加熱後でも爆裂を生じないが、水結合材比20%では、加熱温度400 で爆裂を生じた。一方PP繊維混入水結合材比20%の場合は、600 加熱後でも爆裂が起こらず、体積比でわずか0.1%のPP繊維混入で爆裂を抑制できる。
- (5) 常温時の圧縮強度の結果に基づき、加熱後の各種強度、ヤング係数等を概ね推定できる。

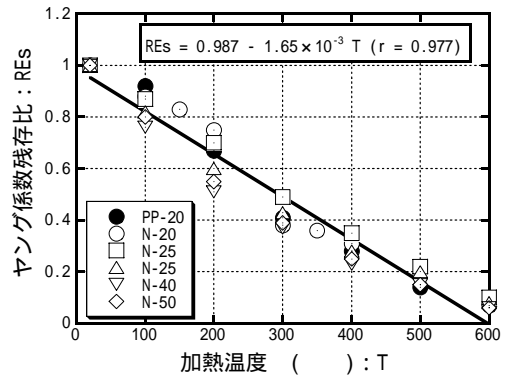


Fig. 7 ヤング係数残存比
Retained Ratio of Young's Modulus

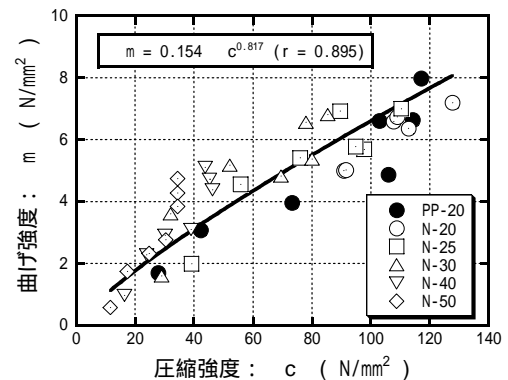


Fig. 8 圧縮強度と曲げ強度
Compressive Strength vs. Bending Strength

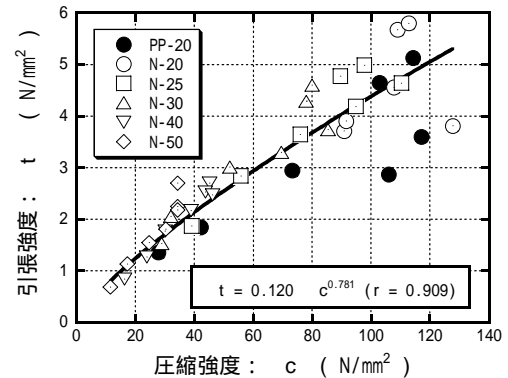


Fig. 9 圧縮強度と引張強度
Compressive Strength vs. Tensile Strength

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研究, 大林組技術研究所報, No.57, p.39-44, (1998)
- 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, p.163-168, (1999)