論文 高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復

一瀬 賢一*1・川口 徹*2・長尾 覚博*3・河辺 伸二*4

要旨: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 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が期待できる。

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,強度回復

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)が多数施工されてきた。RC造は,通常耐火 構造として認められているが,一端火災が生じ るとその再使用においては,材料・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,高温加熱後の力学的性質の 把握が重要であり,筆者らを含め研究報告も増 えつつある^{1),2)}。また普通コンクリートの場合 は,被災後ある期間経過すると受熱温度が500

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⁾。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)}。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、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 ング係数に及ぼす影響について実験的に検討, 考察を加えた。

- 2. 実験概要
- 2.1 実験条件

実験条件は,表-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 骨材に木更津産陸砂,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

表 - 1 実験条件

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			
*:100 -A-182 のデータなし					

*1 (株)大林組技術研究所 建築材料研究室 主任研究員 工博(正会員)

*2 同 室長 工博(正会員) *3 同 プロジェクト部 主席研究員 工博(正会員)

*4 名古屋工業大学大学院助教授 工学研究科 工博(正会員)

を表 - 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表-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,各実験の組合せに対して3本 とした。

2.4 コンクリートの打設と養生

コンクリートの混練は,容量100 ¹ 強制練り ミキサを使用し,160 ¹ (80 ¹ × 2)を1バッチ として3バッチ混練した。フレッシュ性状を測 定した後,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表 - 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。加熱パターンを図-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

表 - 2 骨材の品質

		۰ ۲		~		10	нн :	~			
記号		骨材の種類		表 ⁱ (g	訖密度 ∣/ cm³)	E	粗粒		Ŋ	及水率 (%)	
S		木更津産陸砂				2.59		2.79			1.83
G		青梅産砕石			2.66		6.72			0.81	
表 - 3 コンクリートの調合											
W/C 単1			单位量	kg/m ³)				混和剤			
(%)		W		С		S		G	】対セメント(%		ንኮ(%)
30		175		583		712	8	393	93 C 🗙		1.05%
表 - 4 フレッシュ性状											
パッチ No.	文 索 (时応加 熱温度 ()	()	スラン フロ・ cm × 0	ップ - cm)	単位 積質 (kg/	ফ 重量 m ^³)	空	気量 (%)		温度 ()
20.1		20	6	10	52.0	22	00		2 2		27.5

50-1	200	04.0 × 02.0	2309	5.5	27.5
30-2	300 400	64.0 × 65.0	2320	3.5	27.0
30-3	500 600	66.0 × 66.0	2331	3.4	27.0



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 日までとして行った。

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)の関係を図-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,



図 - 2 加熱温度と圧縮強度および 圧縮強度残存比

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。

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 - 3 に示す。ヤング係数は,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残存比の関係を 図 - 4,図 - 5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,強度に大きく影 響を及ぼすことがわかった。

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 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が起こり,再びCa (OH)₂と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80%以上の圧 縮強度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



図 - 3 加熱温度とヤング係数および ヤング係数残存比



図-4 養生材齢と圧縮強度残存比(水中)



図-5 養生材齢と圧縮強度残存比(気中)

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。

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が, 養生材齢7日では加熱温度100 の供試体の方 が高い強度を示した。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た。その後の 強度変化は小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。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残存比の関係 を図 - 6,図 - 7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 動弹性係数

ヤング係数と動弾性係数の関係を図 - 8 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







図-7 養生材齢とヤング係数残存比(気中)



図 - 8 ヤング係数と動弾性係数



図-9 質量変化率(水中)

体の含水率が大きくなり 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)の関係を図 - 9,図 - 10に示す。この結果によれば,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Ca0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図 - 11~ 図 - 14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







図 - 1 1 応力ひずみ曲線(300 水中)



図 - 1 2 応力ひずみ曲線(300 気中)

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 300 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) 一瀬賢一ほか:高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的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) 原田 有: 建築耐火構法, 工業調査会, 1973.8
- 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.



図 - 13 応力ひずみ曲線(600 水中)



図 - 1 4 応力ひずみ曲線(600 気中)

- 5) Chi-Sun Poon etc. : Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after postfire-curing, Cement and Concrete Research 31, pp.1307-1318, 2001
- 6)田中弘文ほか: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) 岡島達雄ほか: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