

論文 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

一瀬賢一^{*1}・長尾覚博^{*2}・中根 淳^{*3}

要旨: 火災を想定して高温加熱(100~600°C)を受けたコンクリート(水結合材比20~50%)の力学的性質について検討・考察した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 低水結合材比のコンクリートは、ビニロン繊維を0.5%/vol.混入することにより爆裂を防止できる可能性がある。(2) 低水結合材比のコンクリートの加熱前に対する加熱後の圧縮強度、静弾性係数の残存比は、爆裂を起こさなければ普通強度コンクリートと同程度以上の値を有する。(3) 静弾性係数残存比は、シールに比べアンシールでは著しく低下する。特にアンシールの静弾性係数残存比は、600°C加熱で0.1程度まで低下する。

キーワード: 高強度コンクリート、高温加熱、ビニロン繊維、物性、アンシール

1. はじめに

近年設計基準強度(以下Fc)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(RC造)、コンクリート充填形鋼管柱構造(CFT)が、実用化されてきている。RC造は、一般に所定のかぶり厚さがあれば耐火構造として認められているが、高強度コンクリートを使用した場合、組織が緻密になるため、含水状態によっては火災時に爆裂が生じ耐火性能が低くなることが懸念される。またCFTにおいては、無耐火被覆CFTをめざした載荷加熱試験が実施されているが、実大部材での実験は困難であり、被災後の残存耐力は解析的研究による推定が必要と考えられる。このためには、コンクリートが高温にさらされた場合の力学的性質に関する研究が、重要と考えられる。普通強度については多くの研究報告がなされているが[1, 2]、高強度コンクリートについてはそれほど多いとはいえないのが現状である[3]。

このような背景から本研究は、火災を想定して高温加熱(100~600°C)を受けたコンクリート(水結合材比20~50%)の力学的性質について検討・考察を加え、また高強度コンクリートの爆裂防止としてビニロン繊維を混入した場合についても併せて比較・検討した。

2. 試験概要

2. 1 試験の組合せ

試験要因は、表1に示す水結合材比(W/B)5水準、ビニロン繊維(VF)の混入の有無、加熱時の暴露条件2水準、加熱温度7水準、試験材齢2水準とした。なお、試験体の表記方法は、(1) W/B比-(2) VF混入の有無-(3) 加熱時の暴露条件-(4) 加熱温度の順に略号で示す。

表1 試験要因

項目	摘要	水準数
水結合材比	50%, 40%, 30%, 25%, 20%	5
ビニロン繊維の混入の有無	有り(VF)、無し(N)	2
加熱時の暴露条件	シール(S)、アンシール(U)	2
加熱温度	20°C(常温), 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C*, 600°C	7
試験開始材齢	28日, 91日	2

*材齢28日のみ実施

*1 (株) 大林組技術研究所 建築第二研究室 副主任研究員、工修(正会員)

*2 同主任研究員、工博(正会員) *3 同室長、工修(正会員)

2. 2 使用材料および調合

使用材料は、セメント (C) として普通ポルトランドセメント、細骨材 (S) として木更津産丘砂（表乾比重 : 2.60）、粗骨材 (G) として青梅産碎石（硬質砂岩、表乾比重 : 2.65）を使用した。なお、高温を受けるコンクリートの力学的性質の変化は骨材の影響が無視できないが[4]、今回の試験では一般的に使用されるものを選定した。W/B=20% については、混和材としてノルウェー産シリカフューム (SF、比重 : 2.22) を使用した。SFは、セメント重量の内割り 10% 使用した。ビニロン繊維 (VF、比重 : 1.3、引張強度 : 90kg/mm²、ヤング係数 : 2900kg/mm²) は、直径 0.2mm、長さ 12mm のものを使用した。また混和剤として、W/B=50% については、リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤、W/B=20~40% については、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。

各コンクリートの調合条件は、目標スランプを W/B=40%、50% では $21 \pm 2.5\text{cm}$ 、W/B=20~30% については、目標スランプフロー値を $55 \pm 10\text{cm}$ とした。また、VF 混入調合については、若干ワーカビリティーが低下するのを考慮して目標スランプフロー値を $50 \pm 10\text{cm}$ とした。目標空気量は、W/B=50% では $4.0 \pm 1.0\%$ 、W/B=20~40% では $2.5 \pm 1.0\%$ とした。各コンクリートの調合を表 2 に示す。VF 混入調合は、表 2 の同一水結合材比の調合に 0.5%/vol. (6.5kg/m^3) の VF を混入して用いた。

2. 3 測定項目・測定方法

測定項目は、フレッシュ性状（スランプ、スランプフロー、空気量、単位容積質量、コンクリート温度）および加熱前後の外観観察、圧縮強度、静弾性係数である。各測定は、JIS および土木学会規準等に準じて実施した。外観は、目視観察により行った。静弾性係数は、コンプレッソメータによった。試験体の寸法は、 $100 \phi \times 200\text{mm}$ とし、各試験条件に対して 3 本とした。

2. 4 試験体の製作および養生方法

試験体の製作は、容量 100ℓ の強制練りミキサを使用した。試験体は、軽量型枠を用いて製作し、材齢 1 日まで 20°C 、80% の恒温恒湿室で湿润養生とし、翌日封かん養生として所定の材齢まで $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $60 \pm 5\%$ RH の恒温恒湿室で養生した。

2. 5 加熱条件

加熱は、プログラム調節器付き電気炉によった。加熱速度は、速やかに昇温させるため図 1 に示すように約 $100^\circ\text{C}/\text{hr}$ とし、計画加熱温度で試験体内部温度が均一となるように 24 時間保持させた。降温は、炉内のファンを旋回させながら自然冷却として炉内の温度が 50°C 程度に下がるま

表 2 コンクリートの調合

No.	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	SF	S	G
1	20	150	675	75	644	872
2	25	160	640	0	683	925
3	30	170	567	0	729	914
4	40	165	413	0	795	988
5	50	170	340	0	797	995

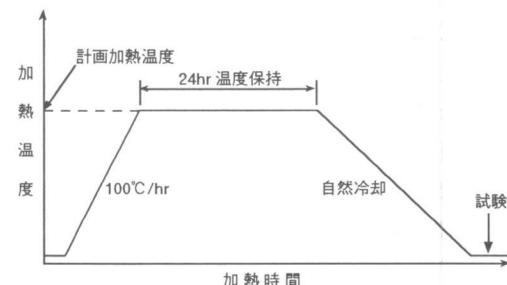


図 1 加熱パターン

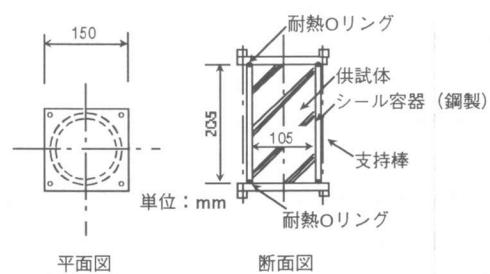


図 2 試験体のシール方法

表3 フレッシュ性状および加熱試験開始時の強度特性

No.	スランプ (cm)	スランプ フロー (mm×mm)	単位容積 質量 (kg/m ³)	空気量 (%)	コンクリ ート温度 (°C)	材齢28日		材齢91日	
						圧縮強度	静弾性係数	圧縮強度	静弾性係数
20%-N	----	490×485	2426	3.3	19.0	108.3	4.07	113.1	4.12
25%-N	----	525×535	2442	2.5	19.5	95.3	3.94	100.0	4.05
30%-N	----	540×545	2401	1.6	17.0	77.1	3.63	84.6	3.77
40%-N	23.0	----	2378	2.7	16.0	55.4	3.44	58.8	3.47
50%-N	20.0	----	2262	4.0	15.5	36.5	2.87	37.2	3.29
20%-VF	----	400×400	2428	3.1	20.5	109.6	4.04	114.0	4.32
25%-VF	----	505×490	2445	1.7	20.5	90.5	3.91	97.7	4.03
30%-VF	----	520×535	2413	1.6	19.5	77.0	3.66	84.0	3.77

* 圧縮強度 : N/mm²、静弾性係数 : × 10⁴ N/mm²

で試験体を放置した。

加熱時の暴露条件は、加熱中に供試体からの水分逸散を認めるアンシール状態と、加熱中に水分逸散が生じないように鋼製の容器に密封したシール状態を設定した。これは、柱部材が火災にあった場合、外部コンクリートはアンシール状態、内部コンクリートはシール状態におかれると予想されるため、この2条件とした。シール容器の外観を図2に示す。シールした場合の加熱温度は、100°Cと200°Cの2水準とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 フレッシュ性状および試験開始時強度

コンクリートのフレッシュ性状および加熱試験開始時の強度試験結果を表3に示す。フレッシュ性状は、ほぼ目標としたスランプ、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%については、VF混入、無混入共に空気量が若干大きめであるが、これはSFを混和した影響と考えられる。

3. 2 外観観察

材齢28日加熱の場合、加熱温度300°C以下では、総ての試験体が形状を保つことができた。400°C以上の加熱では、ほとんどの供試体において表面にひび割れが生じた。特に、20%-N-U供試体は爆裂を生じた。しかし、VFを混入した20%-VF-U供試体は、加熱温度400~600°Cにおいても爆裂を生じなかった。このことから、0.5%/vol. のVF混入により、圧縮強度が100N/mm²を超える高強度コンクリートでも爆裂防止の可能性があることが推察された。

材齢91日加熱の場合は、理由は不明であるが20%-N-U供試体が加熱温度400°Cまで爆裂を生じなかったことを除けば材齢28日加熱の場合と同様の結果となった。

3. 3 圧縮強度

結合材水比と加熱温度別の圧縮強度の関係を図3、4に示す。この結果から、W/B=20%試験体を除けば、各加熱温度における圧縮強度は、結合材水比にはほぼ比例することが分かる。また、材齢28日加熱では300°C、材齢91日加熱では200°Cを超えると低水結合材比ほど大きな強度低下が生じることが分かる。

VF混入の場合、アンシールではW/B=20%を除けばVF無混入同様の強度を示した。20%-VF-U試

験体は、かなりのダメージを受けたが加熱温度400°C以上においても爆裂しておらず、VFの混入量を更に増せば強度改善も可能と考えられる。

加熱温度と圧縮強度残存比の関係を図5、6に示す。ここで圧縮強度残存比は、20°Cの圧縮強度に対する各加熱温度における圧縮強度の比とする。この結果から、アンシールの場合、W/B=20、25%については加熱温度200°Cまで強度増加を示した。特に20%-N-U供試体では、常温試験体の1.16倍の圧縮強度残存比を示した。W/B=30~50%では常温試験体と同程度の強度を示した。また加熱温度300°C以上では、すべての試験体の圧縮強度残存比が低下したが、爆裂した場合を除けば、水結合材比の低いものほど加熱後の圧縮強度残存比が大きい傾向を示した。

一方シールの場合もW/B=20、25%では強度増加を示し、20%-N-S供試体は、加熱温度200°Cで常温供試体の1.19倍の圧縮強度残存比を示した。しかしW/B=30~50%では常温の強度と同程度または低い強度となった。

加熱材齢の影響を比較すると圧縮強度残存比の変化は良く似ており、加熱温度200°Cまでは若干の増加か同程度で、加熱温度300°C以上では低下が認められた。しかし材齢91日加熱では、材齢28日加熱に比べ圧縮強度残存比は全体的にやや低くなり、加熱温度400°C以上では水結合材比によらずほぼ同程度の値を示した。

以上の結果から、W/B=20~30%の高強度コンクリートでも爆裂を防止すれば、普通強度のコンクリートと同等以上の圧縮強度残存比0.3~0.4を得ることができることが分かった。

3. 4 静弾性係数

加熱温度と静弾性係数残存比の関係を図7、8に示す。ここで静弾性係数残存比は、20°Cの静弾性係数に対する各加熱温度における静弾性係数の比とする。静弾性係数残存比は、20%-N-U試験体を除けば、アンシール、シール共に水結合材比の小さい方が大きな値を示した。アンシールでは、加熱温度が高くなるに従いこの差は小さくなる傾向にある。また静弾性係数残存比は、加熱温

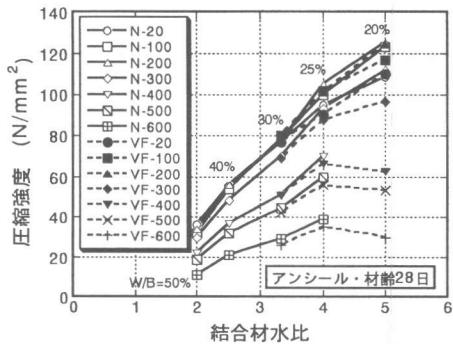


図3 圧縮強度

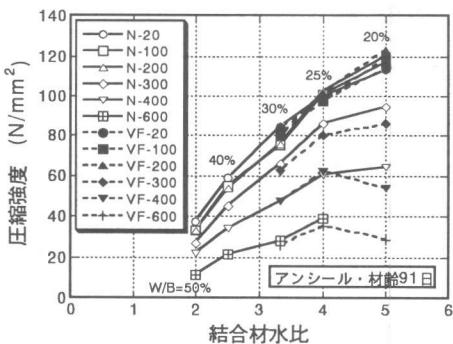


図4 圧縮強度

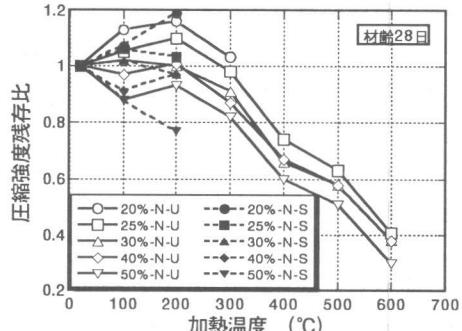


図5 圧縮強度比

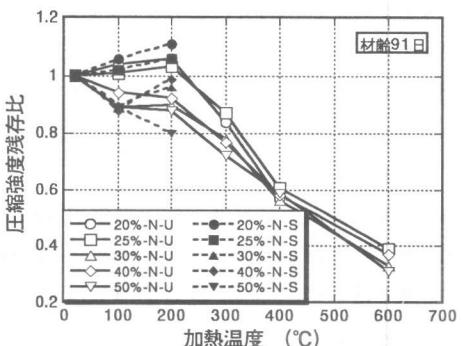


図6 圧縮強度比

度に対しほぼ直線的に低下し、加熱温度600°Cにさらした場合、水結合材比に関係なく0.1程度まで低下することが分かった。シールの場合は、アンシールに比べ静弾性係数残存比の低下は小さく、加熱温度200°CにおいてW/B=20、25%では常温供試体と同程度、W/B=30~50%では0.8以上の静弾性係数残存比を示した。材齢91日においてもほぼ同様の値を示した。

VF混入の場合もVF無混入と同程度の静弾性係数残存比を示したが、20%-VF-U試験体は、加熱温度300°C以上の低下が大きく、圧縮強度同様25%-VF-U試験体よりも小さな値となった。

以上の結果から、W/B=20~30%の高強度コンクリートでも爆裂を防止すれば、普通強度のコンクリートと同程度の静弾性係数残存比を得ることができることが分かった。

3. 5 質量減少率

加熱温度と質量減少率[加熱前後の質量差／試験体容積、を百分率で示したもの]の一部を図9、10に示す。アンシールの場合、加熱温度200°Cまでは急激に質量が減少し、200°C以上ではやや緩やかに減少する。100~300°Cまでは水結合材比の大きいものほど質量減少率が大きいといえる。これは、水結合材比が大きいものほど自由水が多くあり、加熱により蒸発しやすい状態にあるためと推察される。シールの場合は、容器から外への水分の抽出はなかったが、シール容器と試験体との間隙に抽出しており、常温に戻ってから試験体取り外し時に放出したことによる質量減少を示している。シールの場合も水結合材比が大きいものほど、質量減少率は大きくなつた。

3. 6 応力ひずみ曲線

応力ひずみ曲線の一例を図11に示す。アンシールの場合は、水結合材比、VF混入の有無によらず加熱温度が高くなるに従い、単位応力に対するひずみは増大し、破壊時のひずみは大となる。圧縮破壊時におけるひずみと加熱温度との関係を示した図12によると、加熱温度が100°Cを超えると圧縮破壊時のひずみが大となることから水分蒸発の影響がひずみの増大に影響していると推

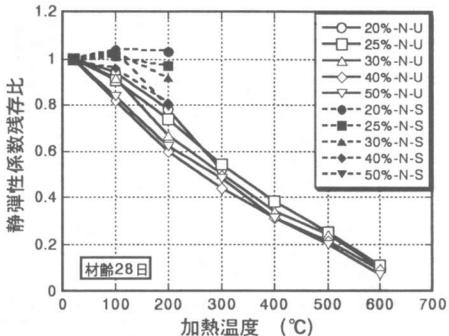


図7 静弾性係数残存比

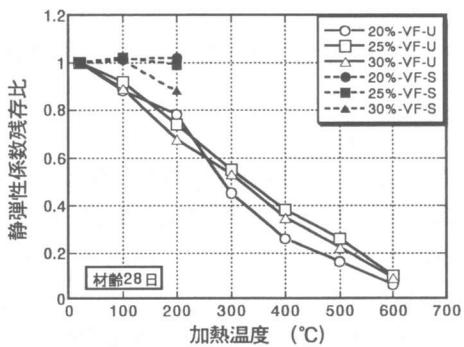


図8 静弾性係数残存比

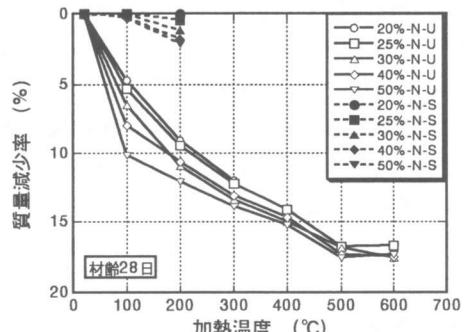


図9 質量減少率

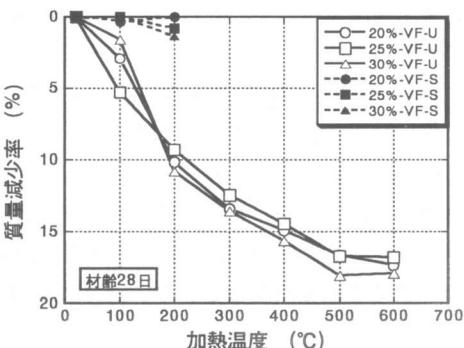


図10 質量減少率

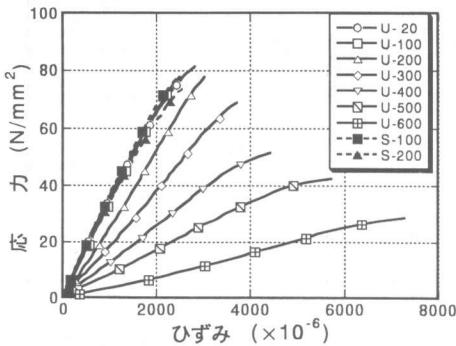


図 1-1 応力ひずみ曲線

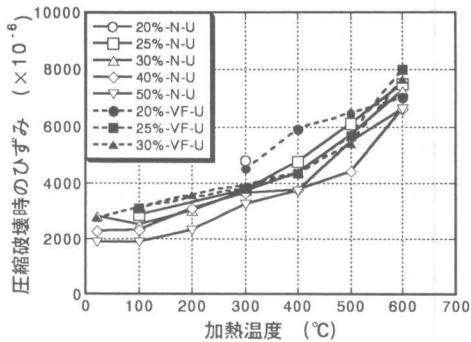


図 1-2 圧縮破壊時のひずみ

察される。また水結合材比、VF 混入の有無による差異は特に認められなかった。

4. まとめ

火災を想定して高温加熱（100～600°C）を受けたコンクリート（水結合材比20～50%）の力学的性質について検討・考察を加えた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 低水結合材比のコンクリートは、ビニロン繊維を0.5%/vol.混入することにより爆裂を防止できる可能性がある。
- (2) 低水結合材比のコンクリートの加熱前に対する加熱後の圧縮強度、静弾性係数の残存比は、爆裂を起こさなければ普通強度のコンクリートと同程度以上の値を有する。
- (3) 静弾性係数残存比は、シールに比べアンシールでは著しく低下する。
- (4) 圧縮強度残存比は、アンシール、シール共にW/B=20、25%では加熱温度200°Cまで増加を示し、W/B=30～50%では、加熱温度200°Cまでは常温と同程度の値を示した。また加熱温度300°C以上ではすべて低下した。600°C加熱後の圧縮強度残存比は、アンシールの場合0.3～0.4を示した。
- (5) 静弾性係数残存比は、アンシールの場合加熱温度が高くなるに従い低下し、600°C加熱後は、0.1まで低下する。シールの場合は、低下し難く200°C加熱後で0.8以上残存した。

今後、骨材等の使用材料の影響、熱間試験との比較等について検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 古村福次郎：高温時におけるコンクリートの力学的性質に関する研究（その1）～（その3）、日本建築学会論文報告集、第172号、pp.11～18、1970、第173号、pp.17～24、1970、第174号、pp.1～7、1970
- [2] 長尾覚博他：高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第457号、pp.1～10、1994
- [3] 廣畠光生他：高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートの高温加熱後の諸物性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp.669～674、1996
- [4] 南 和孝他：微視的温度応力によるコンクリートのマイクロクラックとその影響、土木学会第41回年次学術講演会梗概集、V、pp.129～130、1986