

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

— 瀬 賢 — 長 尾 覚 博

Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High Temperature Heating

Ken-ichi Ichise Kakuhiro Nagao

Abstract

This report describes an experiment on the mechanical properties of high-strength concrete (water binder ratio from 20% to 50%) subjected to high-temperature heating (from 100 to 600°C) assuming a fire, and discusses the results.

The following conclusion were obtained.

1) Concrete with low water binder ratio (20%,25%) mixed with vinylon fiber at 0.5%/vol. can prevent spalling.

2) The retained ratio of compressive strength and static modulus of elasticity after heating to that before heating of concrete with low water binder ratio, is higher than of normal-strength concrete provided spalling does not occur.

3) The retained ratio of static modulus of elasticity in the high-strength concrete subjected to 600°C heating reduces to about 10 percents of that before heating as well as in the normal-strength concrete.

概 要

この報告は、火災を想定して高温加熱（100～600°C）を受けた高強度コンクリート（水結合材比20～50%）の力学的性質についての実験結果および考察を示す。

実験の結果、以下のことが明らかとなった。

1) 低水結合材比（20%・25%）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) 高強度コンクリートの静弾性係数残存比は、普通コンクリートと同様に600°C加熱により加熱前の0.1程度まで低下する。

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）、コンクリート充填形鋼管柱構造（以下CFT）が、実用化されてきている。RC造は、一般に所定の部材寸法およびかぶり厚さを確保すれば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懸念される^{1)~3)}。またCFTにおいては、無耐火被覆CFTをめざした小型試験体による載荷加熱試験が実施されてい

る。しかし、実大部材レベルでの実験は、設備面、コスト面などから困難であり、解析的研究が主流となりつつある。このため高温加熱を受けたコンクリートの力学的性質の把握は、解析精度の向上を図る上できわめて重要と考えられる。普通強度のコンクリートについては多くの研究報告がなされているが^{4), 5)}、高強度コンクリートについては十分な情報がないのが現状である⁶⁾。

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）を受けた高強度コンクリート（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対策としてビニロン繊維を混入した場合の効果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

試験条件は、Table 1に示す水結合材比（以下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、加熱開始材齢2水準とした。なお、試験体の表記方法は、(1)W/B比-(2)ビニロン繊維混入の有無-(3)加熱時の暴露条件-(4)加熱温度-(5)加熱開始材齢の順に略号で示した。

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は骨材の影響を無視できないが、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%の調合のコンクリートについては、混和材としてノルウェー産シリカフェーム（SF、比重：2.22）を使用した。SFは、セメント重量の内割り10%混入した。また高強度コンクリートの爆裂防止として用いたビニロン繊維（比重：1.3、引張強度：90kgf/mm²、ヤング係数：2900kgf/mm²）は、直径0.2mm、長さ12mmのものをW/B=20~30%の調合のコンクリートについて使用した。また混和剤は、W/B=50%に対して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%に対して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、目標スランブをW/B=40%、50%では21±2.5cm、W/B=20~30%については、目標スランブフロー値を55±10cmとした。また、ビニロン繊維を混入するコンクリートについては、若干ワーカビリティが低下するのを考慮して目標スランブフロー値を50±10cmとした。目標空気量は、W/B=50%では4.0±1.0%、W/B=20~40%では2.5±1.0%とした。各コンクリートの調合をTable 2に示す。なおVF混入調合は、Table 2に示した同一水結合材比の調合に0.5%vol.（6.5kg/m³）のビニロン繊維を混入して用いた。

2.3 測定項目・測定方法

測定項目および測定方法の一覧をTable 3に示す。各測定は、JISおよび土木学会規準等に準じて実施した。外観観察は、目視により行った。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、100φ×200mm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、打設後20℃、80%の恒温恒湿室で湿潤養生とし、翌日封かん養生として所定の材齢（28日、91日）まで20±3℃、60±5%RHの恒温恒湿室で養生した。

Table 1 試験条件
Test Condition

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℃(常温),100℃,200℃,300℃,400℃,500℃*,600℃	7
加熱開始材齢	28日,91日	2

*材齢28日のみ

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

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

Table 3 測定項目および測定方法
Measurement Items and Method

測定時期	種類	測定方法等
フレッシュ時	スランブ、スランブフロー、空気量、単位容積質量、コンクリート温度	JIS等に基づく
	外観観察	目視による
加熱前後	動弾性係数	JIS A 1127による
	圧縮強度	JIS A 1108による
	静弾性係数	JSCE-G 502による
	総細孔量	水銀圧入法による

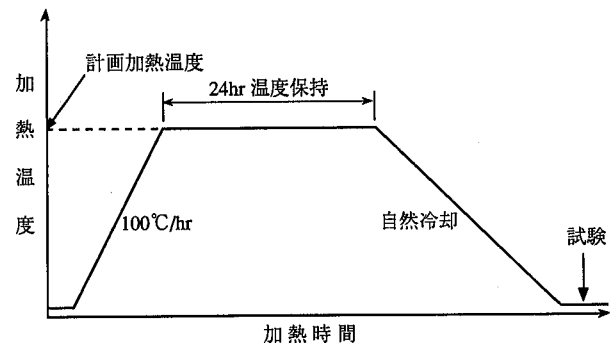


Fig. 1 加熱パターン
Heating Patten

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、Fig. 1に示すように約100℃/hrとし、計画加熱温度到達後は、試験体内部温度が均一となるよう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て炉内の温度が50℃程度に下がるまで試験体を放置した。

加熱時の暴露条件は、加熱中に試験体からの水分逸散を認めるアンシール状態（U）と、加熱中に水分逸散が生じないよう鋼製容器に密封したシール状態（S）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Fig.2に示す。シール条件での加熱温度は、100℃と200℃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Table 4に示す。フレッシュ性状は、概ね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、ビニロン繊維混入、無混入共に空気量が若干大きめとなったが、これはSFを混和した影響と考えられる。

3.2 外観観察

加熱材齢28日の場合、ビニロン繊維無混入のW/B=20%のコンクリートでは、400℃以上加熱した試験体は、すべて爆裂を生じた。その他のコンクリートでは、400℃以上の高温加熱を受けても、表面ひび割れが生じる程度で、爆裂は生じなかった。一方、W/B=20%試験体でもビニロン繊維を混入したものは、400℃以上に加熱しても爆裂は生じなかった。

加熱材齢91日の場合、ビニロン繊維無混入のW/B=20%試験体でも加熱温度400℃までは爆裂を生じなかった。なおビニロン繊維を混入したコンクリートは、すべて爆裂を生じなかった。

これらの結果から、爆裂を生じる条件がコンクリートの強度と加熱温度だけで支配されるものでないことが推察される。また圧縮強度が100N/mm²を超える高強度コンクリートの爆裂防止対策としてビニロン繊維の混入が有効な手段の一つになりうると考えられる。

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Fig. 3, 4に示す。この結果から、爆裂を生じた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。

ビニロン繊維を混入した試験体の加熱後の圧縮強度は、W/B=20%を除いてビニロン繊維を混入しない同一W/B比のコンクリートと同程度になった。一方W/B=20%の場合、加熱温度300℃以上の圧縮強度は、水結合材比の大きいW/B=25%のものと同程度か、若干低い強度となった。ビニロン繊維の混入により爆裂防止効果はあつ

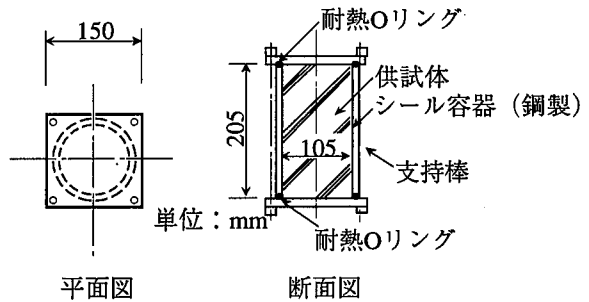


Fig. 2 試験体のシール方法
Sealing Method of Specimen

Table 4 コンクリートのフレッシュ性状および加熱開始時の強度特性
Test Results of Fresh Concrete and Compressive Strength before Heating

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 (℃)	材齢28日		材齢91日	
						圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (10 ⁴ N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (10 ⁴ N/mm ²)
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

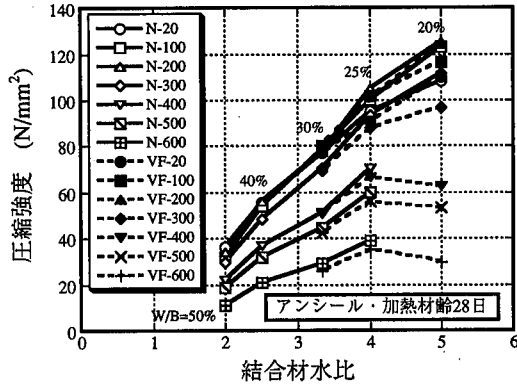


Fig. 3 圧縮強度
Compressive Strength

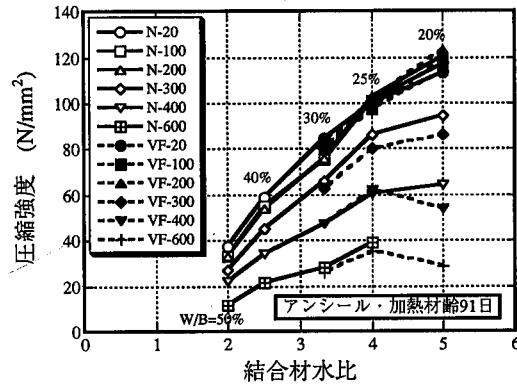


Fig. 4 圧縮強度
Compressive Strength

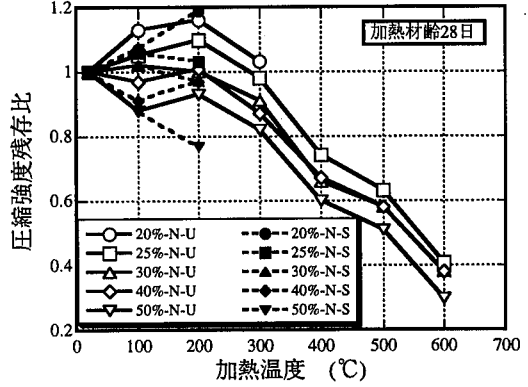


Fig. 5 圧縮強度比
Compressive Strength Ratio

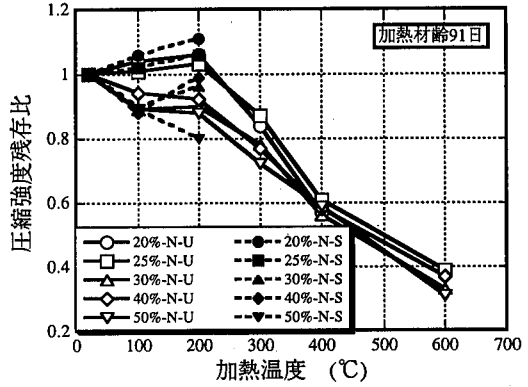


Fig. 6 圧縮強度比
Compressive Strength Ratio

たものの、加熱後の圧縮強度の低下は大きくなった。

加熱温度と圧縮強度残存比の関係をFig. 5, 6に示す。ここで圧縮強度残存比は、20℃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。Fig. 5から、アンシールの場合、W/B=20, 25%については加熱温度200℃まで強度増加を示した。特に20%-N-U試験体では、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℃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試験体は、加熱温度200℃で常温試験体の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近似しており、加熱温度200℃までは若干の増加が同程度で、加熱温度300℃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℃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は、普通強度のコンクリートに比べ圧縮強度の低下は大きいけれども、圧縮強度残存比で比較すると、爆裂を防

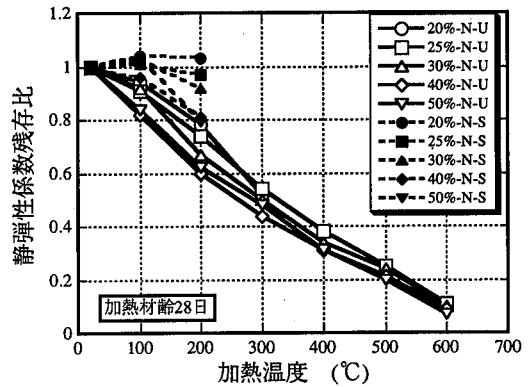


Fig. 7 静弾性係数比
Static Modulus Ratio of Elasticity

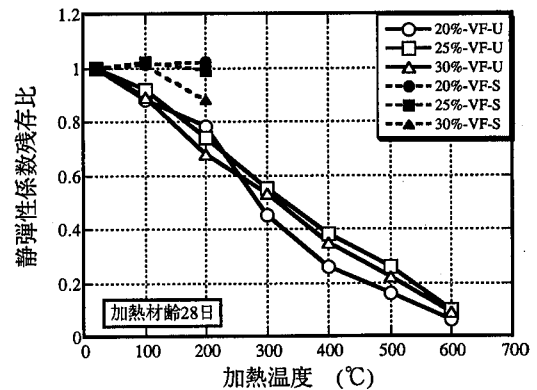


Fig. 8 静弾性係数比
Static Modulus Ratio of Elasticity

止することにより加熱温度600℃においても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Fig. 7, 8に示す。ここで静弾性係数残存比は、20℃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した。静弾性係数残存比は、爆裂した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い傾向を示した。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、加熱温度に対しほぼ直線的に低下し、加熱温度600℃の場合、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。シール条件では、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℃におけるW/B=20, 25%では常温試験体と同程度、W/B=30~50%では0.8以上の静弾性係数残存比を示した。加熱材齢91日においてもほぼ同様の性状を示した。

ビニロン繊維混入の場合もビニロン繊維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℃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られることが分かった。

3.5 動弾性係数

加熱後の加熱材齢28日における静弾性係数と動弾性係数の関係をFig.9に示す。この結果から、加熱温度、水結合材比、シールの有無によらず静弾性係数と動弾性係数との相関性が高い(相関係数R=0.995)ことが分かる。動弾性係数は、静弾性係数よりも一般的には10%程度大きいとされているが、今回の結果は、約20%程度大きい値を示した。これは、加熱によるマイクロクラックが影響したものと推察される。

3.6 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Fig. 10に示す。アンシールの場合、加熱温度200℃までは急激に質量が減少し、200℃以上ではやや緩やかに減少する。100~300℃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。これは、水結合材比の大きいものほど自由水が多いことによると推察される。シール条件の場合は、容器から水分蒸発はなかったが、シール容器と試験体との間に滞留しており、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。

3.7 応力ひずみ曲線

応力ひずみ曲線の一例(30%-N)をFig. 11に示す。アンシールの場合は、水結合材比、ビニロン繊維混入の有

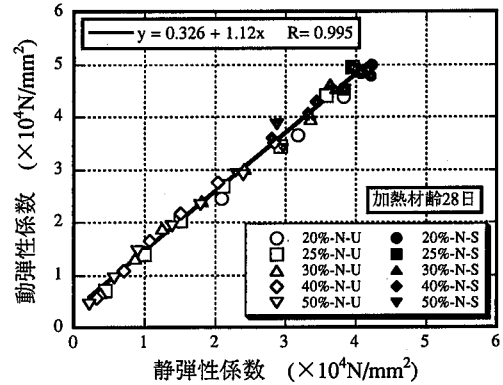


Fig. 9 動弾性係数
Dynamic Modulus of Elasticity

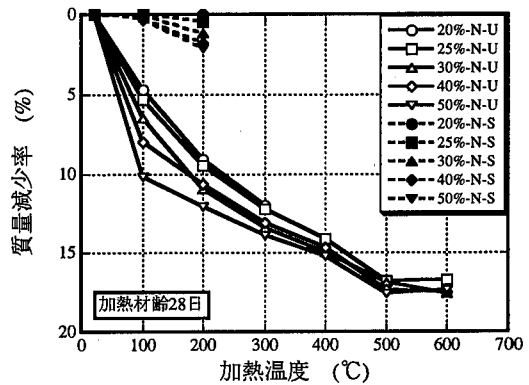


Fig. 10 質量減少率
Mass Reducing Ratio

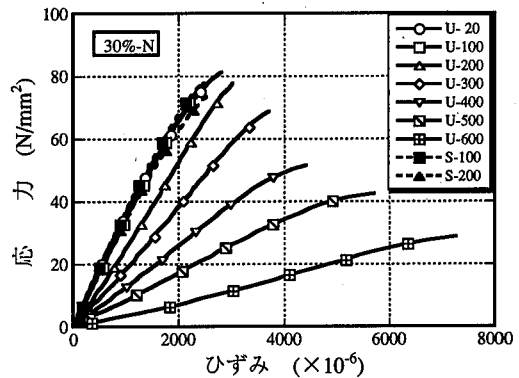


Fig. 11 応力ひずみ曲線
Stress-Strain Curves

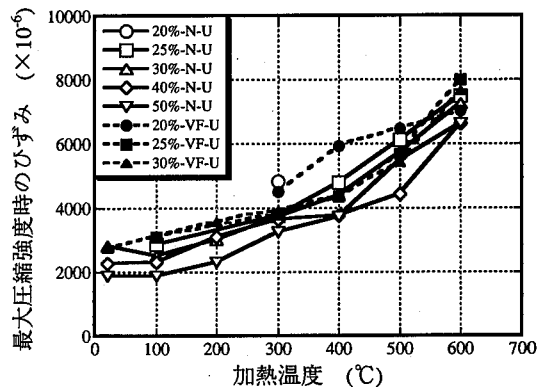


Fig.12 最大圧縮強度時のひずみ
Strains at Max Compressive Strength

無によらず加熱温度が高くなるに従い、最大圧縮強度時のひずみは大となる。最大圧縮強度時におけるひずみと加熱温度との関係をFig. 12に示す。加熱温度が100℃を超えると加熱温度の上昇に従い最大圧縮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察される。またビニロン繊維混入や低水結合材比になるほど同一加熱温度における最大圧縮強度時におけるひずみは大きくなる傾向を示した。

3.8 総細孔量

加熱温度と総細孔量の関係をFig. 13に示す。この結果から、加熱温度が高くなるほど、水結合材比が大きいほど総細孔量が大きくなるのがわかる。また圧縮強度と総細孔量の関係を示したFig. 14より、圧縮強度が低いものほど総細孔量が大きくなるのがわかる。またシールの有無による影響は認められなかった。

4. まとめ

火災を想定して高温加熱（100～600℃）を受けた高強度コンクリート（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（20%、25%）の高強度コンクリートでもビニロン繊維を0.5%vol.混入することにより爆裂防止の可能性がある。
- 2) 低水結合材比の高強度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) 圧縮強度残存比は、W/B=20、25%では加熱温度200℃まで増加し、W/B=30～50%では、加熱温度200℃までは常温と同程度の値を示した。また加熱温度300℃以上ではすべて低下した。600℃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。
- 4) 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℃加熱後は、0.1まで低下する。シールの場合、低下が小さく200℃加熱後で0.8以上残存した。

今後は、高強度コンクリート部材の耐火性評価に必要な熱定数、熱変形状および水分移動性状等の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 長尾覚博他：高強度コンクリートの爆裂に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，p.657-662，（1996）
- 2) 長尾覚博他：高強度コンクリートの爆裂制御に関す

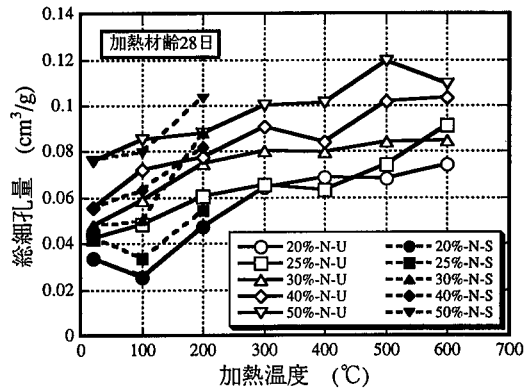


Fig. 13 加熱温度と総細孔量
Heating Temperatures and Total Pore Volume

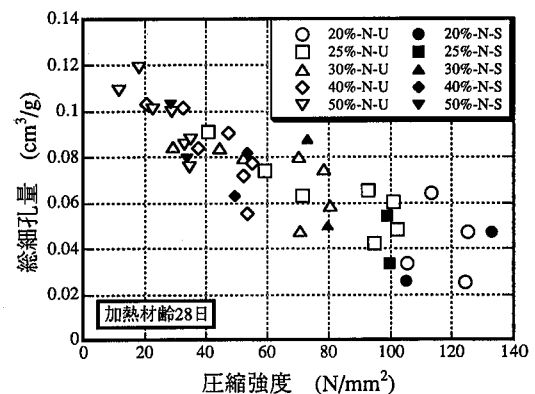


Fig. 14 圧縮強度と総細孔量
Compressive Strength and Total Pore Volume

る検討結果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，p.631-636，（1997）

- 3) 西垣太郎他：超高強度コンクリート（F_c100N/mm²クラス）を用いたRC構造の耐火性，日本建築学会大会学術講演梗概集A-2（関東），p.209-212，（1997.9）
- 4) 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，p.11～18，1970，第173号，p.17～24，1970，第174号，p.1～7，（1970）
- 5) 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，p.1～10，（1994）
- 6) 廣畑光生他：高ビーク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，p.669～674，（1996）
- 7) 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，p.129～130，（1986）