

耐爆裂性能を有する高強度コンクリート ($F_c=80\text{N/mm}^2$) の実用化

森田 武 西田 朗 山崎 庸行
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Development and Application of High-Strength Concrete ($F_c=80\text{N/mm}^2$) Resistant to Spalling under Fire Attack

by Takeshi Morita, Akira Nishida and Nobuyuki Yamazaki

Abstract

High-strength concrete resistant to spalling under fire attack is developed and described in this paper. The destructive spalling of concrete during a fire may cause a reduction of load bearing capacity and fire separating capacity of building elements. To prevent the destructive spalling of concrete, it is known that the addition of synthetic fibers into concrete is very effective. In the development and application of high-strength concrete resistant to spalling whose design compressive strength is 80N/mm^2 , the influence on spalling of synthetic fibers and coarse aggregates in concrete is investigated. A high-strength concrete resistant to spalling is designed based on these material investigations and verified with fire tests on reinforced concrete columns. Furthermore the fire behavior of the reinforced concrete columns is analytically investigated.

概要

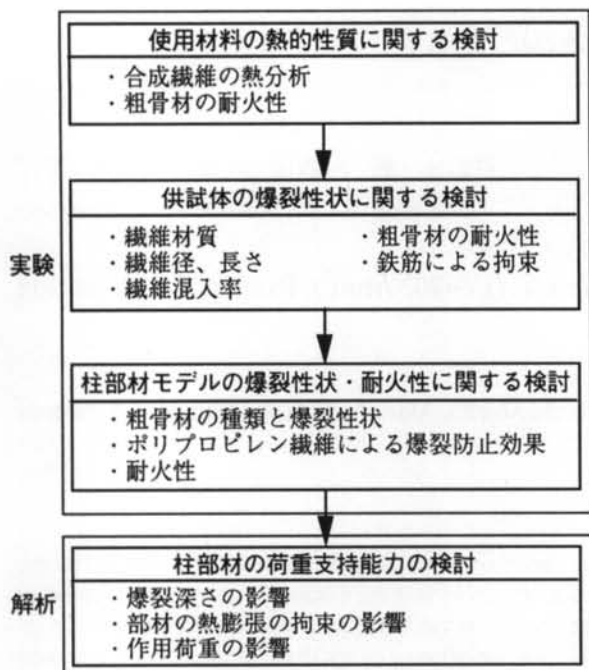
高強度コンクリート部材が火災加熱を受けると、部材表層部分のコンクリートが爆裂により失われる可能性が高く、耐力部材や区画部材の性能を著しく低下させる原因となる。このため、合成繊維を混入して火災加熱に対する耐爆裂性能を高めた設計基準強度 80N/mm^2 の高強度コンクリートを開発した。当該開発における基礎検討段階では合成繊維の材質、寸法および混入率や粗骨材の種類などがコンクリートの爆裂性状に及ぼす影響を実験的に明らかにした。そして、建築物への適用段階においては、柱部材モデルの耐爆裂性能を加熱実験によって確認するとともに、柱の火災時耐力を解析により確認した。

§ 1. はじめに

コンクリート部材が火災加熱を受けると、部材表面部分のコンクリートが飛散もしくは剥離して断面欠損を生じる場合がある。このような断面欠損を爆裂と呼び、標準的な火災加熱を受ける場合、加熱初期の5~40分程度の間には発生することが多い。そのため爆裂の程度によっては、柱や梁などの構造部材の荷重支持性能、防火区画を構成する壁や床などの区画部材の遮熱性能が火災の初期から著しく低下する可能性がある。爆裂の原因には火災時における温度上昇、コンクリートの含水量、骨材の鉱物組成、熱応力などが挙げられ¹⁾、コンクリート強度が高くなると爆裂の可能性が高くなることも認識されている。また、近年は設計基準強度 (F_c) 60N/mm^2 を超える高強度コンクリートが建築物に適用されるようになり、爆裂の問題が危惧されている。このため、JASS5²⁾では $F_c=60\text{N/mm}^2$ を超える高強度コンクリートについて、耐火性を事前に検討して設計に対策をフィードバックさせる必要があることを明記している。

一方、爆裂を防止する対策も種々検討されてきており、筆者らは合成繊維をコンクリートに混入して爆裂を防止する技術に関する情報を得て^{3),4),5)}、国内で初めて当該技術に関する検討に着手し、有効性を確認してきている^{6),7),8)}。合成繊維の混入以外の爆裂防止対策としては、耐火被覆、耐火塗料および強制乾燥などが考えられている。合成繊維の混入による爆裂防止対策はこれらの対策に比べて、コンクリートの施工と爆裂防止対策が同時にできるため工期に影響を与えることがないうえ、経済性に優れている、耐火被覆のように部材断面の仕上り寸法が増大しないなどの利点もあり、極めて合理的な対策であるといえる。

こうしたことから、合成繊維を混入して耐爆裂性能を高めた $F_c=80\text{N/mm}^2$ 高強度コンクリートを開発・実用化することを目的に、図-1に示す流れに従って検討を進めた。検討は大きく分けて、使用材料単体の熱的性質、供試体レベルにおける爆裂性状、柱部材モデルにおける耐火性、および柱の荷重支持能力に関する解析から構成されている。本報ではこれらの一連の検討について報告する。



図一 1 耐爆裂性能を有する $F_c=80N/mm^2$ 高強度コンクリートに関する検討の流れ

§ 2. 使用材料に関する検討

コンクリートが火災加熱を受けると、コンクリート内部の水分が水蒸気に変化して圧力を発生し、この圧力が爆裂の一原因となる。これに対して、合成繊維を混入したコンクリートでは、融点の低い合成繊維が加熱初期に消失または体積減少して水蒸気の抜け道を形成し、水蒸気圧が緩和される。このため、合成繊維の混入は水蒸気圧に起因する爆裂の防止に効果があると考えられている。このメカニズムによる耐爆裂性能の向上では繊維の材質が性能を支配する一つの要因として考えられる。

一方、骨材の鉱物組成もコンクリートの爆裂に影響を及ぼすことから、骨材の耐火性に関する検討が必要である。JASS5²⁾でも、特に耐火性が必要とされる箇所のコンクリートには耐火度の高い骨材を用いる方がよいとしている。

本章では、耐爆裂性能を有するコンクリートを開発するに当たり、その構成材料になりうる合成繊維と粗骨材について実施した熱的性質および耐火性に関する基礎的な実験について述べる。

2.1 実験に供した材料

合成繊維単体の熱的性質に関する実験には、ポリプロピレン (PP)、ビニロン (V) およびアクリル (AC) の各繊維を使用した。粗骨材単体の耐火性に関する実

粗骨材名	種類・物性など
硬質砂岩A	青梅産、密度 $2.65g/cm^3$ 、吸水率 0.79%
硬質砂岩B	葛生産、密度 $2.66g/cm^3$ 、吸水率 0.55% (砂岩質約 60% 、チャート質約 40%)
石灰岩A	葛生産、密度 $2.70g/cm^3$ 、吸水率 1.14%

注) 骨材の密度は表乾状態における値を示す

表一 1 実験に供した粗骨材

験には、 $F_c=80N/mm^2$ を満足することが確認された表一 1 に示す硬質砂岩と石灰岩を使用した。

2.2 実験方法

2.2.1 合成繊維に関する実験

高温時における合成繊維の挙動を明らかにするため、合成繊維単体の熱質量分析・示差熱分析 (TG-DTA 熱分析) を実施した。分析温度は $500^\circ C$ までとした。

2.2.2 粗骨材に関する実験

粗骨材に起因する爆裂を低減するためには、火災のような短期高温加熱に対して粗骨材そのものが爆裂・破損しない性能が要求される。本検討では、旧 JASS5⁹⁾ に示されている「粗骨材の耐火度の判定試験方法 (岸谷委員案)」を適用し、 $800^\circ C$ で 30 分間加熱した骨材の破損状況と質量減少から粗骨材の耐火性を評価した。

また、本検討では参考までに、高温履歴後の冷間における骨材の強度を BS 破砕試験¹⁰⁾ により評価した。履歴温度は常温および $200, 300, 400, 600, 800, 1000^\circ C$ とした。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 合成繊維の熱的性質

図一 2 に TG-DTA 熱分析の結果を示す。図一 2 において、示差熱分析結果から、 $500^\circ C$ までの発熱の最大値は、ポリプロピレン繊維とアクリル繊維ではほぼ同じであり、ビニロン繊維ではこれらの繊維よりも低い。また、熱質量分析結果から、 $300^\circ C$ における質量減少率はポリプロピレン繊維が約 50% 、アクリル繊維が約 10% であり、ビニロン繊維はほとんど質量減少していない。 $500^\circ C$ における質量減少率はポリプロピレン繊維が約 90% 、ビニロン繊維が約 85% 、アクリル繊維が約 30% であり、アクリル繊維の質量減少がポリプロピレン繊維やビニロン繊維の $1/3$ 程度である。

合成繊維による爆裂防止のメカニズムから考えると、加熱初期、すなわち比較的低温で体積減少を生じた方が有利であると考えられる。合成繊維が高温を受ける環境条件が実際 (コンクリート内部) と今回の分析 (自由空間) では異なるが、今回測定された質量減少率が体積減少率に比例すると仮定した場合、ポリプロ

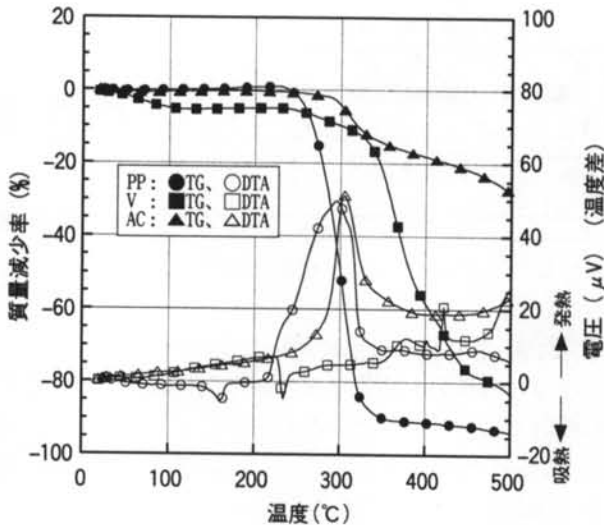


図-2 合成繊維の熱分析結果

ピレン繊維>ビニロン繊維>アクリル繊維の順に爆裂防止性能が高くなると予想される。

2.3.2 粗骨材の耐火性

硬質砂岩 B では、表-1 に示したとおり、砂岩質骨材とチャート質骨材が混在していたこと、チャート質骨材については黒色と緑色のものから構成されていたことなどから、それぞれの種類別に試験を実施した。

2 回の試験における骨材の破損状況と質量減少の評価値の平均値を図-3 に示す。図-3 から、石灰岩 A の骨材個数減少率は硬質砂岩と同様に 0% であり、800℃では損傷しないものと考えられる。石灰岩 A の質量減少率が硬質砂岩に比べて大きいのは、石灰岩の主成分である炭酸カルシウムが 600~900℃で脱炭酸反応を起こすためだと考えられる。チャート質骨材は、加熱中破裂音が確認されたうえ、骨材個数減少率も 12% 以上であり、800℃の加熱により骨材が爆裂・破損するといえる。岸谷委員案の判定基準によれば、2 回の試験で骨材質量減少率と骨材個数減少率のそれぞれが 5% 以下である場合に合格とされる。この基準に準じて評価すると、硬質砂岩 B に含まれていたチャート質骨材ならびに石灰岩 A は不合格となり、硬質砂岩 A と硬質砂岩 B の砂岩質骨材は合格となる。

これらの結果から、チャート質骨材は耐火性の要求されるコンクリートには適しておらず、硬質砂岩 A、硬質砂岩 B の砂岩質骨材、石灰岩 A を比較した場合には、硬質砂岩系の方が耐火性の要求されるコンクリートに適していると考えられる。

図-4 には参考のため実施した高温履歴後の冷間における骨材の BS 破砕試験の結果を示す。図-4 から、400℃程度までの破砕値は硬質砂岩 A、石灰岩 A 共に常温時と同程度であり、強度低下がないことがわかる。

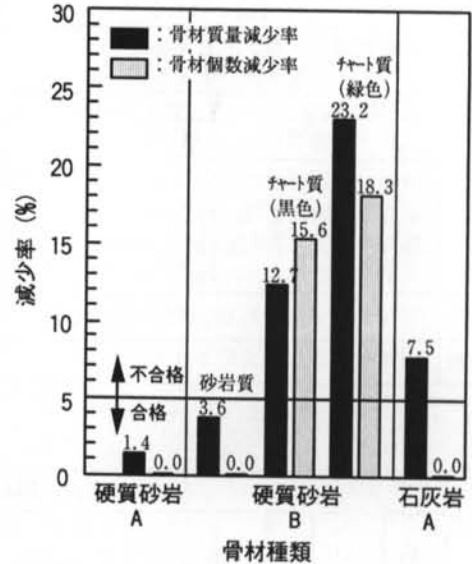


図-3 骨材の耐火度の判定試験結果

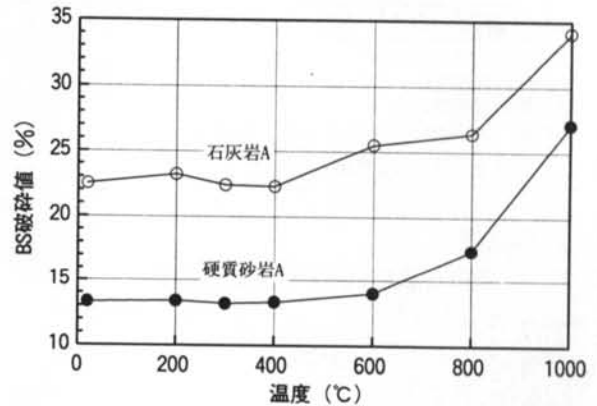


図-4 高温加熱を受けた骨材の BS 破砕値

§ 3. 供試体の爆裂性状に関する検討

本章では、合成繊維の材質、径・長さおよび繊維混入率が爆裂防止性能に及ぼす影響、粗骨材の耐火性が爆裂性状に及ぼす影響、および鉄筋による拘束が爆裂性状に及ぼす影響を調べるために実施したコンクリート供試体に関する耐火実験について述べる。

3.1 コンクリートの使用材料および調合

本検討で用いたコンクリートの使用材料を表-2 に、ベースコンクリートの調合および実験時の圧縮強度と含水率を表-3 に示す。セメントには高ビーライト系セメントを用い、粗骨材には硬質砂岩碎石または石灰岩碎石、細骨材には陸砂を用いた。ベースコンクリートは水セメント比 25% とし、各実験の目的に合わせてベースコンクリートに種々の合成繊維を混入した。

材料	種類・物性など
セメント	中庸熱ポルトランドセメント (高ビークライト系、密度3.20g/cm ³)
粗骨材	SA:硬質砂岩A、CA:石灰岩A、SB:硬質砂岩B (表一参照)
細骨材	陸砂(下記の陸砂を単独または混合して使用) 浜岡産:密度2.59g/cm ³ 、吸水率1.63% 熊谷産:密度2.62g/cm ³ 、吸水率1.47% 佐原産:密度2.60g/cm ³ 、吸水率1.80%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤、
合成繊維	ポリプロピレン、ビニロン、アクリル

表一 2 コンクリートの使用材料

調合名 ¹⁾	調合				耐火実験時性質 ³⁾	
	W/C (%)	s/a ²⁾ (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	強度 (N/mm ²)	含水率 ⁴⁾ (wt%)
SA25	25.0	42.1	165	660	113	4.5
SB25	25.0	43.8	165	660	108	4.3
CA25	25.0	42.4	165	660	107	4.6

- 1) SA:硬質砂岩A、SB:硬質砂岩B、CA:石灰岩A
- 2) 粗骨材かさ容積を一定とした。
- 3) 標準養生(材齢28日)
- 4) 供試体(φ100mm×200mm)を105℃で乾燥して求めた。

表一 3 コンクリートの調合

3.2 供試体

3.2.1 繊維材質の検討に用いた供試体

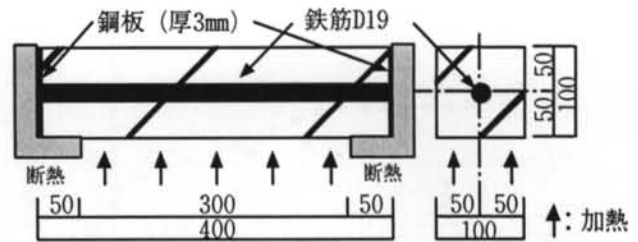
繊維の材質が爆裂防止性能に及ぼす影響の検討では、ベースコンクリートに SA25 を用い、ポリプロピレン(径48μm、長さ10mm)、ビニロン(径43μm、長さ10mm)およびアクリル(径12μm、長さ10mm)の各繊維を0.10vol%の割合で混入した。供試体の形状はφ150mm×300mmの円柱で、供試体数は各仕様3本ずつとした。供試体は耐火実験時まで標準養生した。

3.2.2 繊維径・長さの検討に用いた供試体

合成繊維の繊維径と長さがコンクリートの爆裂性状に及ぼす影響の検討では、ベースコンクリートに SA25 を用い、繊維径12、18、30、48および100μm、繊維長さ5、10、20mm(径100μmの繊維については12mmのみ)のポリプロピレン繊維を0.10vol%の割合で混入した。供試体の形状は100mm×100mm×400mmの角柱で、供試体数は各仕様3本ずつとした。供試体は耐火実験時まで標準養生した。

3.2.3 繊維混入率の検討に用いた供試体

合成繊維の混入量と爆裂防止性能の関係の検討では、ベースコンクリートに SA25 を用い、径100μm長さ12mmおよび径48μm長さ10mmのポリプロピレン繊維を0.05、0.10、0.30vol%の割合で混入した。供試体の形状は100mm×100mm×400mmの角柱で、供試体数は各仕様3本ずつとした。供試体は耐火実験時まで標準養生した。



図一 5 供試体の形状・寸法と加熱

3.2.4 粗骨材の検討に用いた供試体

粗骨材の種類と繊維混入率が爆裂性状に及ぼす影響の検討では、ベースコンクリートに SA25、SB25 および CA25 を用い、ポリプロピレン繊維(径100μm、長さ12mm)を0.05、0.10、0.30vol%の割合で混入した。供試体の形状は100mm×100mm×400mmの角柱で、供試体数は各仕様3本ずつとした。供試体は耐火実験時まで標準養生した。

3.2.5 鉄筋による拘束の検討に用いた供試体

コンクリートの熱膨張の鉄筋による拘束が爆裂性状に及ぼす影響の検討では、ベースコンクリートに SA25 を用い、ポリプロピレン繊維(径100μm、長さ12mm)を0.30vol%の割合で混入した。供試体の形状は100mm×100mm×400mmの角柱とし、コンクリートの熱膨張は、図一5に示すように3mm厚の鋼板を両端に取りつけたD19(SD345)鉄筋を角柱供試体の長軸方向に配して拘束した。供試体数は、鉄筋を配筋したものと無配筋のものを同時に製作し、各仕様3本ずつとした。供試体は耐火実験時まで標準養生した。

3.3 実験方法

3.3.1 加熱方法

3.2の各項で説明した供試体に関する耐火実験はコンクリートの材齢が28日の時点で実施した。材齢28日に耐火実験を実施した理由は、所定の圧縮強度が発現していること、若材齢ほどコンクリートの含水量が多く水蒸気圧に起因する爆裂が発生し易いと考えたことによる。耐火実験における加熱温度は ISO834¹¹⁾の標準加熱温度時間曲線に準じ、加熱時間は1時間とした。加熱にはオイルバーナーを熱源とした耐火試験炉を用いた。φ150mm×300mmの円柱供試体の加熱では、耐火試験炉内に設置された各供試体の加熱条件が均一になるように、バーナー火炎からの直接の放射熱伝達を遮蔽した。100mm×100mm×400mmの角柱供試体では供試体の一面(面積100mm×300mm)のみが均一に加熱されるようにした(図一5参照)。

3.3.2 測定項目

φ150mm×300mmおよび100mm×100mm×400mmの各供試体について、加熱実験前後の質量を測定し、

加熱後の加熱面の状態を目視観察した。また、100mm×100mm×400mmの角柱供試体では加熱面の爆裂深さを縦横20mmピッチ(96点/面)で測定した。

3.4 実験結果および考察

3.4.1 繊維材質の影響

加熱実験後の供試体の状況を写真-1に示す。写真-1から、ポリプロピレン繊維とビニロン繊維では爆裂防止効果があるが、アクリル繊維では効果がないことがわかる。ポリプロピレン繊維やビニロン繊維に比べてアクリル繊維の爆裂防止性能が劣るという実験結果は、2.3.1における推定と一致する。アクリル繊維が爆裂防止に効果がなかったのは、コンクリート内部の水蒸気圧が爆裂を生じさせるような高圧に達する以前に、圧力を緩和するために必要な空隙がコンクリート(モルタル)中に形成されていなかったためと考えられる。

2.3.1と本実験の結果から、爆裂防止に有効な合成繊維としては、熱質量分析(TG分析)における繊維の質量減少率が500℃において85%以上であることが一つの条件であるといえる。ポリプロピレン繊維とビニロン繊維を比較した場合、耐火実験後の外観(写真-1)には明瞭な差はなかった。しかし、熱質量分析結果では、350℃までの質量減少率がポリプロピレン繊維で約90%、ビニロン繊維で約30%であったことから、ポリプロピレン繊維の方がコンクリート中の水蒸気圧の緩和に有利であると考えられる。

3.4.2 繊維径・長さの影響

爆裂深さの測定結果(3体の平均)を図-6に示す。径48 μ m長さ5mmの繊維および径100 μ m長さ12mmの繊維において、加熱面における平均爆裂深さは2mm以下、最大爆裂深さは5~8mmであった。

繊維長5mmに着目すると、繊維径が小さいものは爆裂していない。同じ体積パーセントの繊維をコンクリートに混入する場合、同じ長さの繊維であれば繊維径が小さいほどコンクリート中の繊維の本数が増え、繊維間の距離が短くなる。このため、繊維が消失または体積減少した後に形成される管状空隙までの水蒸気の拡散距離が短くなり、結果的にコンクリート中を移動する水蒸気の移動速度が速くなるため、圧力の緩和に有利になるものと考えられる。

繊維径48 μ mにおいて繊維長に着目すると、繊維長5mmでは爆裂しているが繊維長10mmでは爆裂していない。これは繊維が長いほど繊維が消失または体積減少した後に形成される管状空隙が長くなり、コンクリート中の水蒸気の移動速度が速くなるため、圧力の緩和に有利になるものと考えられる。

以上から、コンクリート中の水蒸気の移動速度を増

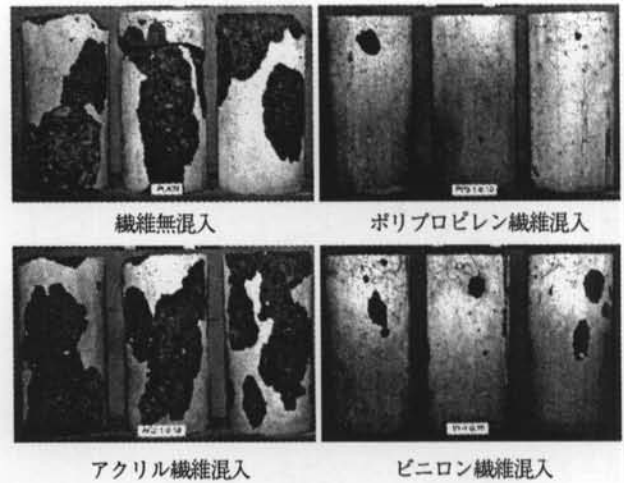


写真-1 合成繊維の種類と爆裂防止効果

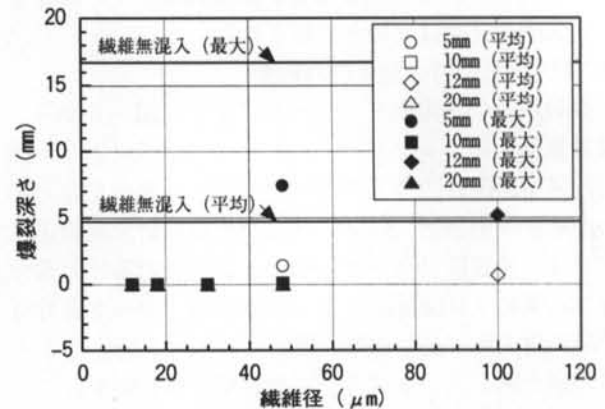


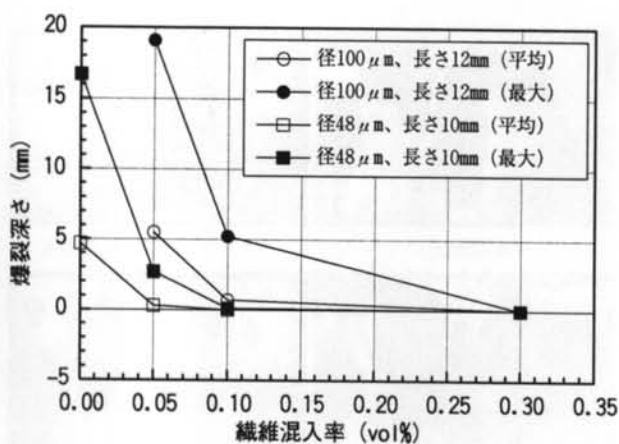
図-6 繊維径・長さとの関係

すには、管状空隙間の距離を小さくして水蒸気の拡散距離を小さくし、管状空隙を長くして管状空隙を通じての水蒸気の移動距離を長くすることが効果的である。コンクリート中の水蒸気の移動速度は繊維混入率、繊維径および繊維長さの相互作用で決まるものであり、これらの因子のうちどの因子を優先させるかは、爆裂防止の観点からだけでなく、施工性などの観点からも考える必要がある。

3.4.3 繊維混入率と爆裂防止効果

爆裂深さと繊維混入率の関係を図-7に示す。図-7から、繊維の混入率が大きいほど爆裂防止効果の大きいことがわかる。2mmの繊維長の差が爆裂防止性能に大きく影響しないとすると、径48 μ mの繊維の方が径100 μ mの繊維よりも爆裂防止性能に優れているといえ、繊維径の小さい方が有利であるという3.4.2の考察を裏付ける結果になった。

コンクリートの強度が高いほど爆裂を防止するために必要な繊維の混入量は多くなると考えられるが、標準的な火災加熱を受ける水セメント比25%の硬質砂岩使用コンクリートにおいて、水蒸気圧に起因する爆裂を防止するために、本実験に使用したポリプロピレン



図一七 繊維混入率と爆裂深さの関係

繊維と同じものを用いる場合、0.30vol%以上の繊維量を混入する必要はないと判断される。

3.4.4 粗骨材の耐火性の影響

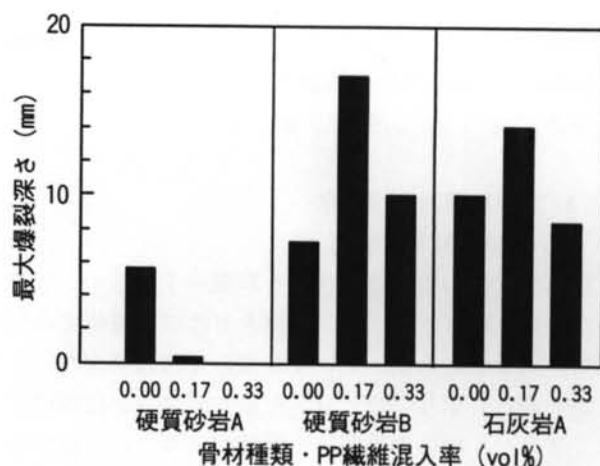
爆裂深さの測定結果を図一八に示す。図一八から、繊維無混入のコンクリートにおいては、石灰岩 A > 硬質砂岩 B > 硬質砂岩 A の順に爆裂が大きかったことがわかる。一方、2.3.2に示した骨材の耐火度判定試験では、硬質砂岩 A > 硬質砂岩 B に含まれる砂岩質骨材 > 石灰岩 A > 硬質砂岩 B に含まれるチャート質骨材の順に耐火度が高かった。硬質砂岩 B と石灰岩 A どちらの耐火度が高いかについての判断は難しいが、これら2種類の骨材に比べて骨材の耐火度に優れていた硬質砂岩 A を用いた方が爆裂は小さかった。

一方、ポリプロピレン繊維による爆裂防止効果については、硬質砂岩 B と石灰岩 A を用いたコンクリートの結果を見ると、全く爆裂防止効果が得られていない。これは、合成繊維によってコンクリート中に生じる水蒸気圧を緩和したにもかかわらず爆裂が発生したということであり、粗骨材が爆裂に大きく関与していたものと推察される。

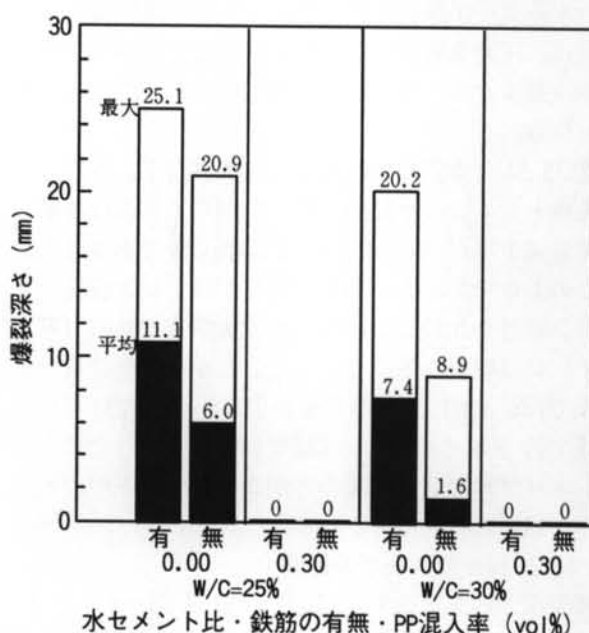
以上から、供試体レベルにおけるコンクリートの爆裂性状では骨材の耐火度が大きく影響しているものと考えられる。そして、合成繊維の混入は水蒸気圧に起因する爆裂防止には有効であるが、骨材に起因する爆裂を防止することはできないといえる。

3.4.5 鉄筋による拘束の影響

鉄筋の有無、繊維混入の有無が爆裂性状に及ぼす影響を図一九に示す。なお、図一九には水セメント比30%のコンクリートを用いて同等な実験を実施した結果も参考に示した。図一九から、ポリプロピレン繊維を混入していない場合において、鉄筋を配した供試体の方が無筋の供試体に比べて爆裂が大ききこと、鉄筋の有無による爆裂深さの差は5~6mm程度であり水セメント比による違いは小さいことなどがわかる。また、鉄



図一八 各骨材使用コンクリート供試体の爆裂深さ



図一九 鉄筋を配した供試体の爆裂深さ

筋の有無にかかわらずポリプロピレン繊維を0.30vol%混入することにより爆裂が防止できていることもわかる。

鉄筋を挿入した供試体では、鉄筋により表層コンクリートの熱膨張は拘束を受け、表層コンクリートに熱応力(圧縮力)が生じる。無筋よりも有筋の供試体で爆裂が大きかったのは、この熱応力(圧縮力)が爆裂を助長したためだと考えられる。このことから、表層コンクリートの爆裂は、表層コンクリートを面外方向に押し出そうとする水蒸気圧と材軸方向に発生する熱応力(圧縮力)との相互作用によるといえる。そして、両方の応力またはどちらか一方の応力を低減することで爆裂を低減できるといえ、本実験の場合、無筋の供試体が熱応力(圧縮力)を低減したケース、ポリプロピレン繊維を混入した供試体が水蒸気圧に起因する応力を低減したケースとして考えられる。

§ 4. 柱部材モデルにおける耐火性の確認

4.1 外部荷重に関する前提

部材に作用する外部荷重が部材の爆裂性状に及ぼす影響については、影響があるとする結果¹²⁾と影響がなかったとする結果⁶⁾がある。文献 12)では外部荷重が大きいほど爆裂を生じ易いとしており、文献 6)では外部荷重の有無によって爆裂性状に差異がなかったことが示されている。3.4.5では内部拘束を受けると爆裂が助長されること、文献 6)では外部荷重の影響がなかったことなどから考えると、鉄筋コンクリート部材内部の鉄筋量がある臨界量を超えると外部荷重が爆裂に及ぼす影響は無視でき、その臨界量より小さい場合には外部荷重の影響が顕在化してくる可能性が考えられる。鉄筋コンクリート柱の場合、加熱初期に表層コンクリートの熱膨張を拘束するのは部材断面において最も外周側に配置された主筋(最外側主筋)である。鉄筋の臨界量および最外側主筋の考え方によると、本検討における柱試験体の最外側主筋量は、文献 6)の柱試験体の約 2 倍であり、十分に大きいことから、本検討における柱試験体の爆裂性状では外部荷重の有無が影響しないものと考えられる。

4.2 柱試験体

4.2.1 コンクリートの使用材料および調合

柱部材モデルの耐火性の検討においても、粗骨材の種類が爆裂性状に及ぼす影響を確認するため、硬質砂

材料	種類・物性など
セメント	中庸熱ポルトランドセメント (高ビーライト系、密度 3.20g/cm^3)
粗骨材	SA:硬質砂岩A、CA:石灰岩A (表-1参照) SB':硬質砂岩B' (密度 2.66g/cm^3 、吸水率 0.55%)
細骨材	混合砂(熊谷産陸砂:佐原産陸砂=75:25) 熊谷産:密度 2.62g/cm^3 、吸水率 1.47% 佐原産:密度 2.60g/cm^3 、吸水率 1.80%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

注) 硬質砂岩B'は硬質砂岩Bからチャート質骨材を除いたもの

表-4 コンクリートの使用材料

試験体名 ¹⁾	調合					耐火実験時性質 ²⁾	
	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	PP繊維 (vol%)	強度 (N/mm^2)	含水率 ³⁾ (wt%)
C-SA-0	24.3	42.6	165	679	0	118	4.2
C-SA-2	24.3	42.6	165	679	0.22	111	4.2
C-SB'-0	24.3	42.6	165	679	0	118	4.0
C-SB'-2	24.3	42.6	165	679	0.22	110	4.0
C-CA-0	25.0	43.3	165	660	0	113	4.4

1) SA, SB', CAは粗骨材種類、2) 現場封緘養生(材齢約2ヶ月)

3) 供試体($\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$)を 105°C で乾燥して求めた。

表-5 コンクリートの調合、圧縮強度、含水率

岩と石灰岩を使用した $F_c=80\text{N/mm}^2$ 高強度コンクリートを用いて柱試験体を製作した。コンクリートの使用材料を表-4に、調合および耐火実験時(材齢約2ヶ月)における圧縮強度と含水率を表-5に示す。粗骨材について、§ 2.および§ 3.から硬質砂岩Bにチャート質骨材が含まれているとコンクリートの耐火性に悪影響を及ぼすことが確認されたこと、チャート質骨材を含まない硬質砂岩B(以下、硬質砂岩B'と称す)が入り可能であったことから、柱部材モデルの検討においては硬質砂岩B'を使用した。爆裂防止に用いるポリプロピレン繊維(径 $100\mu\text{m}$ 、長さ 12mm)の混入率は $0.22\text{vol}\%$ ($=2\text{kg/m}^3$)とした。当該混入率は3.4.3および3.4.5から、無筋の供試体では混入率 $0.10\text{vol}\%$ でも十分に爆裂を低減できていたこと、有筋の供試体でも混入率 $0.30\text{vol}\%$ で爆裂を完全に防止できていたことなどの結果から決定した。

4.2.2 試験体の形状・寸法

柱試験体の形状・寸法を図-10に示す。試験体は断面を $700\text{mm} \times 700\text{mm}$ 、高さを 1400mm とし、鉄筋の被り厚は約 110mm とした。主筋にはD29(SD345)を16本使用し、帯筋はD13(SD295A)を 100mm 間隔で配した。鉄筋量と鉄筋の被り厚は、実際に建設される高層鉄筋コンクリート構造において採用される柱断面を参考にして決定した。試験体内部の鉄筋温度は柱の高さ方向を二等分する断面において、図-10に示す様に帯筋位置で8点測定した。

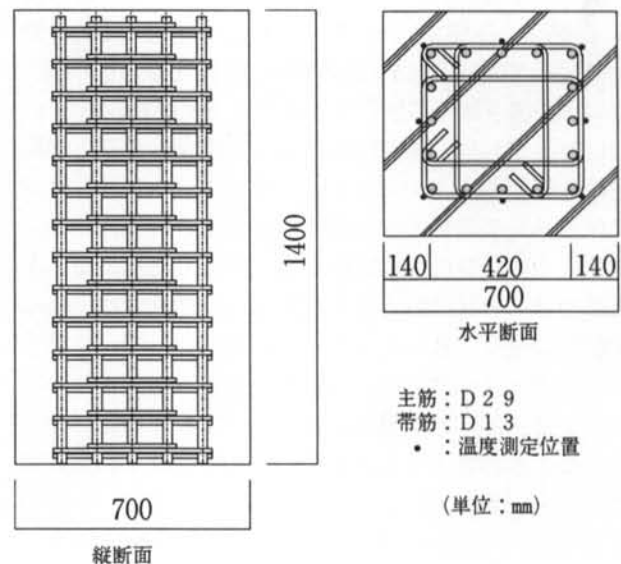


図-10 柱試験体の形状・寸法

4.3 実験方法

4.3.1 加熱方法

柱試験体は4側面が均等に加熱されるように耐火試験炉内に配置し、ISO834の加熱曲線に準じて3時間加熱した。なお、試験体の吊りフックの保護や転倒を防止するため、幅15cmの耐火被覆を試験体の上下端に巻き付けた。

4.3.2 測定項目

実験時の測定項目は加熱時の炉内温度、試験体の鉄筋温度(8点)、および爆裂深さ(加熱実験後)とした。爆裂深さは、柱試験体側面部の高さ方向を8等分、幅方向を4等分するようなグリッドを考え、グリッドの交点において測定し、さらに目視により最も爆裂が深いと判断された箇所の爆裂深さも測定した。

4.4 実験結果および考察

4.4.1 爆裂性状

各試験体の加熱実験後の状況を写真-2、爆裂深さの比較を図-11に示す。

写真-2から、ポリプロピレン繊維無混入の試験体C-SA-0、C-SB'-0およびC-CA-0では側面部の中央付近で帯筋が露出しているが、ポリプロピレン繊維を混入した試験体C-SA-2およびC-SB'-2では鉄筋の露出がないことが明らかである。また、ポリプロピレン繊維の混入、無混入にかかわらず、各試験体の隅角部では鉄筋が露出していないことから、隅角部よりも側面部の爆裂が深かったことがわかる。

図-11において、爆裂深さに及ぼす粗骨材の影響をC-SA-0、C-SB'-0およびC-CA-0で比較すると、最大爆裂深さは石灰岩A>硬質砂岩A≒硬質砂岩B'の順、平均爆裂深さは硬質砂岩A>石灰岩A≒硬質砂岩B'の順になっており、硬質砂岩B'は硬質砂岩Aよりも柱における爆裂が小さいことがわかる。§3.に示した供試体レベルの爆裂性状の確認では骨材の耐火性がコンクリートの爆裂性状を支配する一要因であったが、本実験では、骨材の耐火性が柱試験体の爆裂性状に及ぼす影響は確認されなかった。この理由として、供試体レベルでは評価できない熱応力の影響が考えられ、本実験では、熱応力が爆裂性状に及ぼす影響が骨材の耐火性による影響よりも卓越していたと推察される。繊維の混入、無混入による平均爆裂深さの差は、C-SA-0とC-SA-2で39mm、C-SB'-0とC-SB'-2で38mmである。このことから、硬質砂岩砕石を使用したコンクリートの場合、ポリプロピレン繊維を0.22vol%の割合で混入すれば、爆裂深さを約40mm低減できることがわかる。

4.4.2 鉄筋温度

硬質砂岩を使用した柱試験体の鉄筋平均温度の経時変化を図-12、鉄筋最高温度を図-13に示す。図

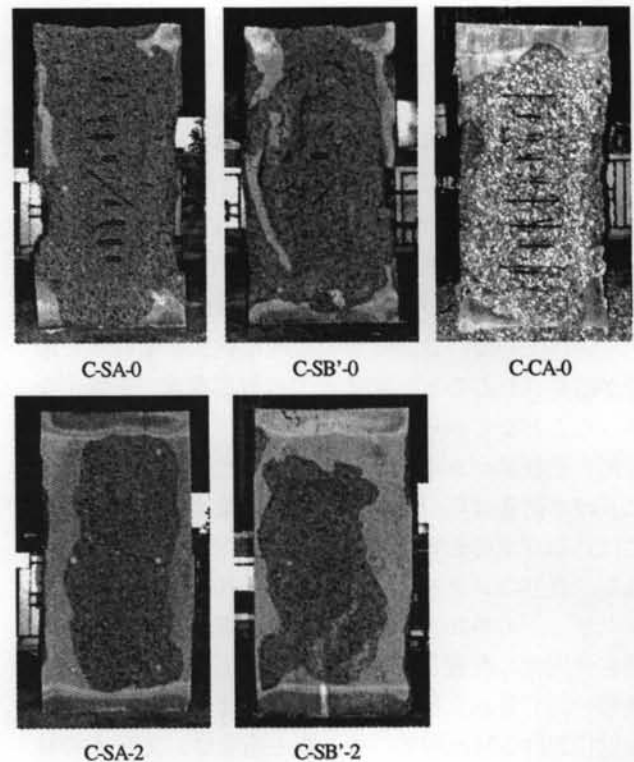


写真-2 加熱実験後の試験体の状況

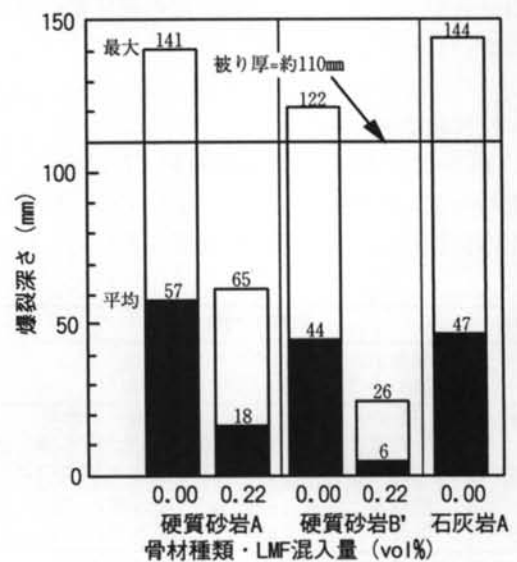
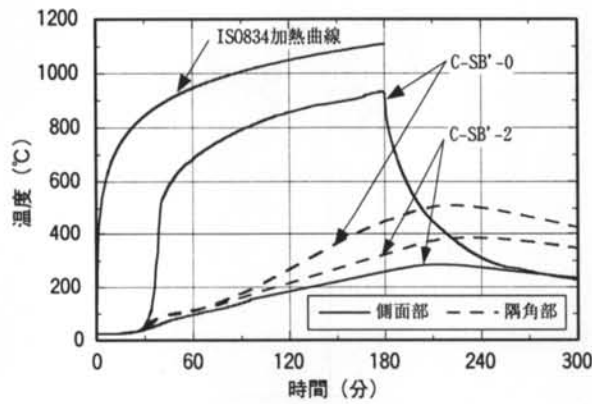
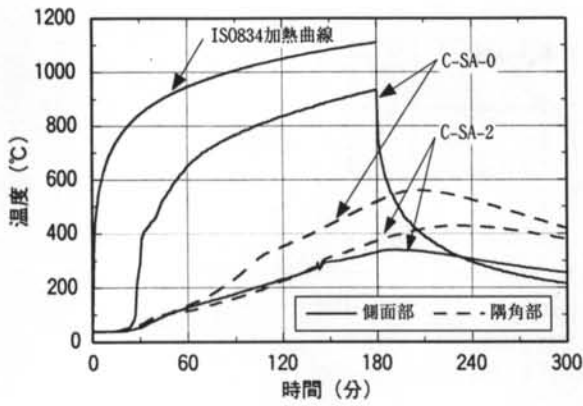
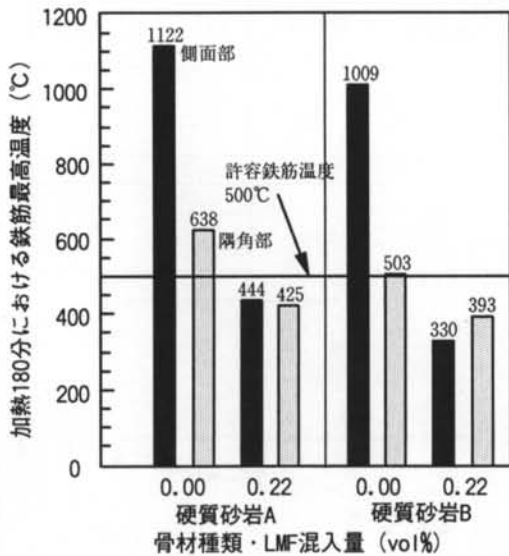


図-11 爆裂深さの比較

図-12から、各試験体の鉄筋平均温度の経時変化を比較すると、C-SA-0およびC-SB'-0において、側面中央の帯筋が急激な温度上昇を始めた時間は加熱開始後約30分であり、この時間帯までに被りコンクリートが著しく失われ、帯筋が炉内の火熱に直接暴露される程の状態に達したものと考えられる。C-SA-2およびC-SB'-2では鉄筋温度の急激な変化はなく、被りコンクリートが部材内部への熱の流入を抑制していることがわかる。図-13から、C-SA-0およびC-SB'-0では側面部の鉄筋が1000℃を超える温度に達しており、加熱180分における炉内温度とほぼ同等になっているが、C-SA-2



図一 2 鉄筋平均温度の経時変化
(上図：C-SA-0、C-SA-2、下図：C-SB'-0、C-SB'-2)



図一 3 180分加熱終了時における鉄筋最高温度

および C-SB'-2 では 180 分における鉄筋温度が 500°C 以下であることがわかる。

4.4.3 耐火性

高温履歴後の冷間における鉄筋の降伏強度や引張強度は履歴温度が 500°C 程度であれば、高温履歴前の強度に回復する¹³⁾。また、高温履歴後の冷間におけるコ

ンクリートの強度は骨材種類によっても異なるが、履歴温度が 500°C 程度の場合、高温履歴前の強度の約 1/2 に低下する¹³⁾。JIS A 1304¹⁴⁾には鉄筋コンクリート造の耐力部材に関する耐火試験結果の判定基準として、鉄筋最高温度が 500°C 以下でなければならないことが示されている。この温度は鉄筋が再使用可能な温度の目安であるといえ、さらにその鉄筋より内側のコンクリートの受熱温度が 500°C 以下であることを保証するものである。今回の実験結果では、C-SA-2 と C-SB'-2 の鉄筋最高温度が 500°C 以下に抑えられており、ポリプロピレン繊維無混入の柱試験体に比べて明らかに耐火性能が向上し、再使用を想定した場合には軽微な補修・補強で済むと考えられる。一方、ポリプロピレン繊維無混入の柱試験体は鉄筋温度が 1000°C を超えていることから、帯筋、最外側主筋およびそれより内側のコンクリートの被害度は大きく、大規模な補修・補強が必要になると考えられる。

本実験における硬質砂岩使用 $F_c=80\text{N/mm}^2$ 高強度コンクリートを用いた柱試験体の爆裂を完全に防止するためには、ポリプロピレン繊維の混入量を 0.22vol% よりも多くする必要がある。しかしながら、上述したことを根拠として、鉄筋最高温度を 500°C 以下に抑えることが柱部材の耐火性能を保証する一つの目標値とするならば、混入量 0.22vol% で 3 時間耐火の性能を達成できることが確認された。

§ 5. 柱の荷重支持能力に関する解析的検討

火災時の柱の荷重支持能力を調べる方法としては載荷加熱実験があるが、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ のような高強度コンクリートを用いた実大柱の実験は現在の一般的な試験装置では実施が困難である。一方、火災時における鉄筋コンクリート部材の荷重支持能力を解析的に検討する方法が種々提案されてきている。ここでは柱の荷重支持能力を解析により検討した。

5.1 解析内容

5.1.1 解析柱

本解析では実際に建設される高層鉄筋コンクリート構造で $F_c=80\text{N/mm}^2$ 高強度コンクリートを用いる柱部材を想定した。図一 1 4 に解析対象の柱断面を示す。実際の柱ではコアの主筋に超高強度鉄筋を使用するが、ここではすべて SD490 とした。柱高さは 4500mm であり、長期設計軸力は 15.2MN である。当該柱の常温時における軸耐力を主筋の降伏強度とコンクリートの圧縮強度から算定すると 99.8MN となる。また、弾性係数比を 10 と仮定すると長期許容軸力は 38.2MN となり、

長期設計軸力は長期許容軸力の約 40%である。

5.1.2 解析ケース

爆裂深さ、軸力および熱膨張に起因する軸方向の伸びの拘束を要因とした。爆裂深さは、§ 4. に示した実験結果から危険側を想定して、ポリプロピレン繊維を混入しない柱として 110mm (最外側主筋が露出)、ポリプロピレン繊維を混入した柱として 45mm (最外側主筋の被りが 65mm 残存) を仮定した。柱の熱膨張による軸方向の伸びについては、実際の構造骨組の下層階柱を想定した場合、拘束の無い状態で柱が自由に伸びることはない。そして、建物の層数が増すほど下層柱の伸びに対する拘束度は大きくなることから、ここでは柱の伸びが完全に拘束される場合も想定した (図-15)。表-6 に解析内容の一覧を示す。

5.2 解析方法および条件

時間積分直接剛性法を適用した構造物の熱応力変形解析プログラム^{15),16)}に 遷移クリープひずみや高温時の応力-ひずみ関係に及ぼす外部荷重の影響を考慮したコンクリートモデル^{17),18)}を導入したコンピュータプログラムを使用して、火災時における柱の挙動を解析した。本解析の主な前提条件は次のとおりである。

1) 温度解析条件

- ・火災温度：ISO834 の加熱温度時間曲線
- ・材料の熱定数：EUROCODE4 モデル¹⁹⁾を適用
- ・コンクリート：密度 2400kg/m³、含水率 4wt%
- ・加熱前から部材表面部の断面欠損が生じている

2) 構造挙動解析

- ・高温時の鉄筋の機械的性質：EUROCODE4 を適用
- ・コンクリートの圧縮強度：80N/mm²
- ・高温時のコンクリートの機械的性質：文献 17)、18) に示されるモデルを適用、強度低下には文献 20) に示されるモデルを適用
- ・座屈は生じない

5.3 解析結果および考察

5.3.1 最外側主筋の温度

柱断面内の鉄筋温度の経時変化を図-16 に示す。図-16 から、爆裂深さ 110mm (鉄筋露出) を仮定した場合、加熱に直接曝される隅角部の主筋温度は加熱開始後 45 分から炉内温度と同じ履歴をたどり、側面部の主筋温度は加熱開始後 120 分に約 1000℃に達する。一方、爆裂深さ 45mm (残存被り厚 65mm) を仮定した場合、加熱開始後 30 分経過したあたりで、コンクリートに含まれる水分の蒸発のため、主筋温度が 100℃で停滞している。温度上昇は鉄筋が露出している場合に比べて緩やかであり、加熱 180 分における主筋温度は側面部で約 400℃、隅角部で約 600℃である。

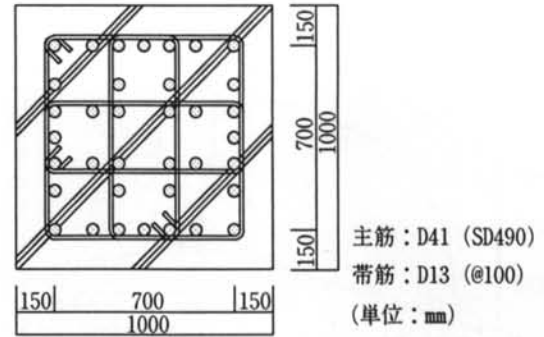


図-14 解析対象柱の断面

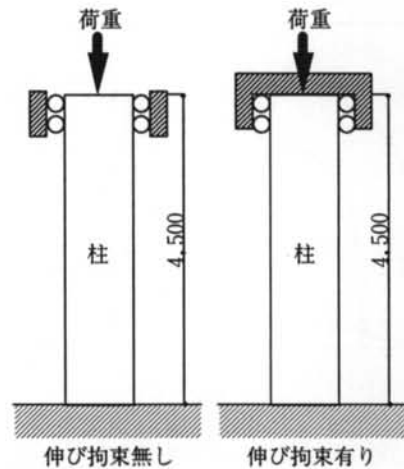


図-15 柱端部の支持 (拘束) 条件

解析名	爆裂深さ (mm)	軸力 (MN)	伸び拘束
S-45-15F	45	15.2	無
S-45-30F		30.4	
S-45-38F		38.2	
S-45-15R	110	15.2	有
S-110-15F		15.2	
S-110-30F		30.4	
S-110-38F	110	38.2	無
S-110-15R		15.2	

表-6 解析内容

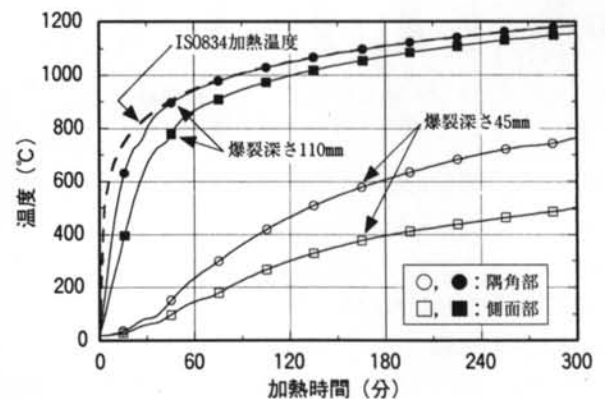


図-16 主筋温度の経時変化

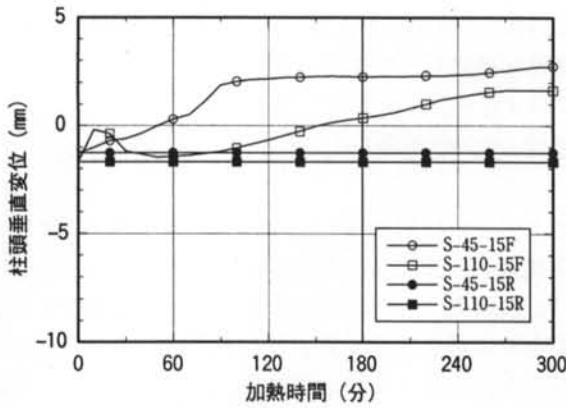


図-1 17 柱頭変位の経時変化 (伸び拘束の影響)

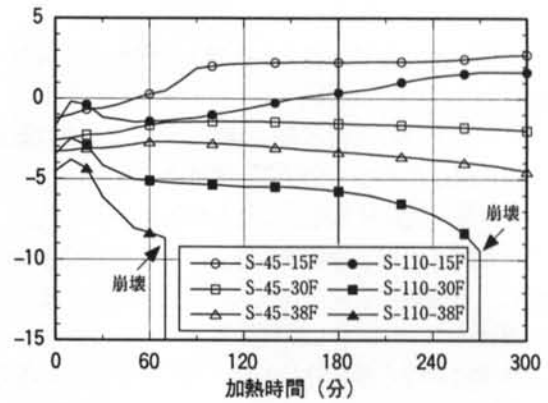


図-1 19 柱頭変位の経時変化 (軸力の影響)

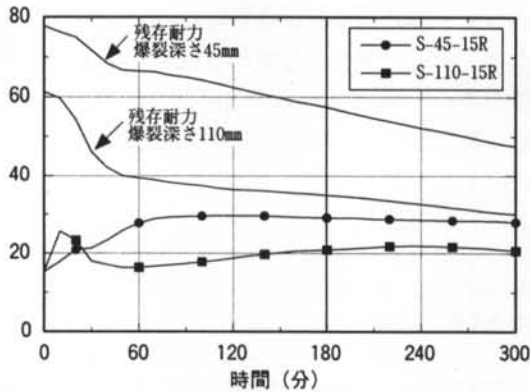


図-1 18 伸び変位を拘束した時の軸方向力の経時変化

5. 3. 2 拘束の影響

伸び拘束をパラメータにした柱頭変位の経時変化を図-1 17に示す。図-1 17から、爆裂深さおよび伸び変位の拘束の有無に関わらず、柱は300分の加熱に対して長期設計軸力を支持している。また、図-1 18は、図-1 17に示した伸び拘束を受ける柱に生じる軸方向力の経時変化を示しているが、累加強度から求めた残存耐力が作用軸力より大きいことから、加熱開始後300分の時点においても余力があることがわかる。

熱膨張による伸びの拘束を受けない柱において、爆裂深さ110mmを仮定した柱では一度軸方向に伸びた後、収縮し、再び伸び出す。はじめの伸出しは最外側鉄筋の熱膨張によっており、最外側主筋の温度が上昇して耐力が失われることにより収縮する。二回目の伸出しは内部の鉄筋やコンクリートの熱膨張によっている。爆裂深さ45mmを仮定した柱では、加熱開始後90分ほど経過した時点から軸方向の変形がほぼ一定になっている。これは、外周部付近のコンクリートおよび最外側主筋の熱膨張力と、最外側主筋より内部の主筋の拘束力が釣り合っているためだと考えられる。

5. 3. 3 作用荷重の大きさの影響

外部軸力の大きさをパラメータにした柱頭垂直変位の経時変化を図-1 19に示す。図-1 19は伸びの拘束

を受けない柱に関して、軸力の大きさが柱頭変位に及ぼす影響を比較したものである。爆裂深さ110mmを仮定した柱において、長期設計軸力の2倍および長期許容軸力を作用させた場合には、それぞれ加熱開始後270分、70分に変形が急増して崩壊に至っている。一方、爆裂深さ45mmを仮定した柱においては、長期設計軸力の2倍および長期許容軸力を作用させた場合でも崩壊に至っていない。

本解析から、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ 高強度コンクリートを用いる柱部材は被りのコンクリートが全て失われるような爆裂を生じても300分の加熱に対して長期設計軸力を支持できることがわかった。日本における鉄筋コンクリート構造の柱断面は通常短期のせん断力(地震力)で決まることが多く100%の長期許容軸力が作用することはないが²¹⁾、100%の長期許容軸力が作用し、かつ被りのコンクリートが全て失われている場合には、加熱開始後90分以内に柱が崩壊する危険性のあることが示唆された。しかし、このような危険性はポリプロピレン繊維を混入して爆裂を防止あるいは低減することにより軽減できる。

§ 6. まとめ

本報では、耐爆裂性能を有する $F_c=80\text{N/mm}^2$ 高強度コンクリートを実用化するために実施した種々の検討について述べた。各検討結果をまとめると次のとおりである。

1) 使用材料、供試体に関する検討結果

- (a)ポリプロピレン繊維とビニロン繊維は爆裂防止効果があるが、ポリプロピレン繊維の方が有効である。
- (b)繊維径が細く、長い方が爆裂防止効果は高い。
- (c)水セメント比25%のコンクリートではポリプロピレン繊維(径 $100\mu\text{m}$ 、長さ12mm)を0.30vol%混入すれば

水蒸気圧に起因する爆裂を防止できる。

(d)骨材の耐火度は硬質砂岩>石灰岩>チャート質骨材の順に高い。

(e)硬質砂岩および石灰岩ともに 400℃以下であれば破砕値が常温と同じであり、骨材の強度は低下しない。

(f)耐火度の高い粗骨材を使用した方が爆裂は小さい。

(g)骨材に起因する爆裂は繊維を混入しても防止できない。

(h)鉄筋による拘束はコンクリートの爆裂を助長する。

2) 柱部材モデルに関する検討結果

(a)柱試験体における爆裂性状では、骨材の耐火性の影響が見られなかった。

(b)ポリプロピレン繊維を 0.22vol%混入することで爆裂深さを約 40mm 低減でき、3 時間の標準加熱に対して鉄筋最高温度を 500℃以下に抑えられた。

(c)ポリプロピレン繊維を混入した柱は、無混入の柱に比べて被災後の補修・補強が軽微になるといえる。

3) 解析による柱の荷重支持能力の検討結果

(a)最外側主筋が露出した柱でも、長期設計軸力を 300 分の標準加熱に対して支持できる。100%の長期許容軸力が作用すると、90 分以内に崩壊する可能性がある。

(b)崩壊の危険は爆裂を低減することで回避できる。

以上の検討結果から、 $F_c=80\text{N/mm}^2$ 高強度コンクリートを使用した柱部材に所要の耐火性能を保持させるためには、耐火度の高い骨材を使用する、爆裂防止に有効な合成繊維を適量混入するなどの対策によってコンクリートの耐爆裂性能を高めることが重要であるといえる。また、本検討で得られた知見は $F_c=80\text{N/mm}^2$ に限らず、さらに強度の高いコンクリートの爆裂防止対策においても参考になると考えられる。

今後、本報に示した検討の成果を利用して、耐爆裂性能を高めた $F_c=80\text{N/mm}^2$ 高強度コンクリートを実際の高層鉄筋コンクリート構造に国内で初めて適用することが決定している。

<参考文献>

- 1) U. シュナイダー (森永他 訳)：“コンクリートの熱的性質”，技報堂出版株式会社，1983
- 2) 日本建築学会編：“建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事”，丸善株式会社，1997
- 3) Untersuchungsbericht Nr.5034/0342 - Nau/Di/Ha - der MPA Braunschweig：“Herstellung von 9 Stützenabschnitten und Prüfung unter Brandbeanspruchung nach der Einheitstemperaturzeitkurve gemäß DIN4102”，Untersuchung auf Antrag der Fa. BAGRAT, Trier, TU Braunschweig, December 1991
- 4) Untersuchungsbericht Nr.5106/1062 - Nau/Di/Ha - der MPA Braunschweig：“Herstellung einer Stütze aus hochfestem Normalbeton und Druckführung einer Brandprüfung mit Beanspruchung nach der Einheitstemperaturzeitkurve gemäß DIN4102”，Untersuchung auf Antrag der Fa. BAGRAT, Trier, TU Braunschweig, April 1993
- 5) Untersuchungsbericht Nr.5001/0013 - Di/Bru - der MPA Braunschweig：“Herstellung von Stützenabschnitten aus 10 verschiedenen Mischungen hochfestem Beton und ihre Prüfung unter Brandbeanspruchung nach der Einheitstemperaturzeitkurve gemäß DIN4102 (ISO834)”，Untersuchung auf Antrag der Fa. BAGRAT, Trier, TU Braunschweig, October 1993
- 6) 西田, 山崎, 井上, 渡部：“爆裂防止用ポリプロピレン短繊維を混入した高強度コンクリートの性状に関する研究 (その1-その4)”，日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), pp.331-338, 1994年9月
- 7) 西田, 森田, 山崎：“高強度コンクリート部材の耐火性に関する研究 (その1-その3)”，日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.229-234, 1996年9月
- 8) 森田, 西田, 山崎：“ポリプロピレン短繊維を混入した高強度コンクリート部材の耐火性 (その1, その2)”，日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.63-66, 1998年9月
- 9) 日本建築学会編：“建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事”，丸善株式会社，1991
- 10) British Standard Institute：“Method for sampling and testing of mineral aggregates, sands and fillers”，British Standard 812
- 11) International Organization for Standardization：“ISO834 Fire-resistance tests - Elements of building construction”，1975
- 12) Meyer-Ottens, C.：“Zur Frage der Abplatzungen an Bauteilen aus Beton bei Brandbeanspruchungen”，WILHERMERNST & SOHN KG, 1975
- 13) 日本火災学会編：“火災便覧 (新版)”，共立出版株式会社，1984
- 14) 日本工業規格協会：“JIS A 1304 建築構造部分の耐火試験方法”，1994
- 15) 上杉, 小池：“高層鉄骨架構の熱応力解析 (その1)”，日本建築学会構造系論文報告集, 368号, 1986年
- 16) Saito, H., Uesugi, H., Yamaguchi, M. and Kodaira, A.：“Thermal Stress and Deformation of Steel Structure of High Rise Buildings in Fire”，FIRE SAFETY SCIENCE - Proceedings of the Second International Symposium on Fire Safety Science, pp.719-728, 1989
- 17) Schneider, U., Morita, T. and Franssen, J.-M.：“A Concrete Model Considering the Load History Applied to Centrally Loaded Columns under Fire Attack”，FIRE SAFETY SCIENCE - Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Safety Science, pp.1101-1112, 1994
- 18) Morita, T., Schneider, U. and Franssen, J.-M.：“Influence of Stress History Function in the Schneider-concrete-model under Fire Attack”，FIRE SAFETY SCIENCE - Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, pp.1057-1068, 1997
- 19) CEN：“EUROCODE4 Design of Composite Steel and Concrete Structures Draft for Part 1.2: Structural Fire Design”，CEN/TC250/SC4, 1994
- 20) Diederichs, U., Jumpanan, U.-M. and Penta, V.：“Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperature”，13th Congress Report, International Association for Bridge and Structural Engineering, 1988
- 21) 斎藤, 大内, 湯谷, 西垣, 丹羽, 宮本, 谷田貝, 高橋：“建築構造物の長期設計荷重時応力 (その3 柱部材)”，日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.171-172, 1997年9月