

シールドトンネルの覆エコンクリートにおける

耐火工構築技術に関する研究

(A Study on Measures of Fire Protection for Lining Concrete of Shield Tunnel)

学位取得年月 2020年 3月

川西 貴士

論文の要旨

題目 シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工構築技術に関する研究
(A Study on Measures of Fire Protection for Lining Concrete of Shield Tunnel)

氏名 川西 貴士

都市部の地下に構築されるシールドトンネルでは、車両火災に備えた安全性に焦点が当てられている。万が一可燃物を満載した車両による火災事故が発生すると、閉鎖された空間で可燃物が燃焼するため、トンネル坑内の温度は急速に 1000℃以上まで上昇する可能性が高い。このような高温下に覆工コンクリートが晒された場合、爆裂を生じたり、強度低下を引き起こすため、甚大な被害を招くことになりかねない。そのため、覆工コンクリートには耐爆裂性や遮熱性といった耐火性の確保が求められている。これまでに建築分野では、耐火性を確保するために、ポリプロピレン短繊維 (PP 繊維) による爆裂の抑制や、かぶりの設置による遮熱性の確保といった対策がとられてきた。シールドトンネルでは、覆工コンクリートを火害から保護するために、覆工コンクリートの表面に耐火被覆を施す対策がとられてきたが、近年は PP 繊維の混入により、覆工コンクリート自体に耐火性を付与する対策が取られるようになってきている。しかし、シールドトンネルの耐火性の検証には、建築分野と異なりトンネル火災を想定した厳しい加熱条件である RABT 曲線が使用される。これまでに、この RABT 曲線による耐火実験が実施され、学協会や発注機関において、耐火工の種類、要求性能、耐火性の検証方法、および維持管理の考え方などについて、基準や指針類で取りまとめられている。しかし、具体的な使用材料、配合および施工方法については使用者の判断に任されており、体系的な整理はされていない。

そこで、本研究では、覆工コンクリート自体に耐火性を付与するための使用材料や配合を明らかにし、耐火工の構築技術を具体的に提案することを目的とした。耐火性を有するコンクリートの使用材料や配合を選定するために、最初に耐爆裂性を確保するための最適な PP 繊維の選定を行い、水結合材比に応じた PP 繊維の混入率について検討を行った。次に、耐爆裂性を確保するには、直径が小さく、アスペクト比の大きい PP 繊維が必要であり、PP 繊維の混入により流動性および材料分離抵抗性が大きく低下する。そのため、PP 繊維を混入する場合の配合の修正方法について検討を行った。一方で、RABT 曲線による加熱を受けた場合、覆工コンクリートは強度低下を招く。加熱による劣化範囲を特定して、劣化したコンクリートを除去し、次の火災に備えて耐火性を有する材料にて補修を行う必要がある。そのため、劣化範囲の簡易な調査方法、劣化部の除去方法および吹付けや左官仕上げによる補修方法について検討を行った。そして、これらの検討で得られた知見を用いて、シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工の構築に向けて、PP 繊維の混入により耐火性を付与したセグメントおよび現場打ちコンクリートを提案し、その施工性や耐火性について検証を行った。

最初に、耐爆裂性の確保に向けて最適な PP 繊維を選定するために、覆工コンクリートを模擬した小型の平板試験体を用いて RABT 曲線による耐火実験を行い、PP 繊維の形状や混入率が爆裂に及ぼす影響について検討を行った。その結果、PP 繊維の直径や表面積の他に、繊維のアスペクト比が重要な要因となることや、同一の混入率であれば、PP 繊維のアスペクト比の増加に伴い

爆裂深さが低減することを確認した。また、圧縮強度の増加や水結合材比の低下に伴い、PP 繊維の混入率を増加する必要があることを確認した。そして、繊維度 17dtex×長さ 20mm でアスペクト比 410 の繊維、および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm でアスペクト比 570 の繊維が最適であることを明らかとし、爆裂を制御するための結合材水比に応じたこれらの PP 繊維の混入率の目安を定量的に示した。

次に、これらの PP 繊維を混入する場合の配合の修正方法を検討するために、覆工コンクリートで一般に使用されるスランプ 15cm 程度のコンクリート（以下、スランプタイプと呼称）および高流動コンクリート（以下、高流動タイプと呼称）について、PP 繊維の混入がコンクリートの流動性や材料分離抵抗性に及ぼす影響について確認を行った。その結果、PP 繊維の混入率の増加に伴い、流動性が低下するため、単位水量を増加する必要があることを確認した。また、PP 繊維の混入率の増加に伴い、材料分離抵抗性も低下するため、所要の流動性を保持しながら材料分離抵抗性を確保するには、単位粗骨材絶対容積を低減する必要があることを確認した。これらの単位水量および単位粗骨材絶対容積の補正量は、スランプタイプより高流動タイプの方が大きく、かつ PP 繊維のアスペクト比が大きいほど増加することを確認した。得られた知見をもとに、PP 繊維を混入する場合に、所要の流動性および材料分離抵抗性を確保するための耐火コンクリートの配合の修正方法を示した。

一方で、シールドトンネルの覆工コンクリートが火害を受けた場合、劣化部の補修を行う必要がある。トンネル内で車両火災が発生した場合、広範囲の覆工コンクリートが影響を受けるため、できるだけ効率的に劣化範囲を特定し、補修を行う必要がある。そこで、エコーチップ硬さ試験機を用いた反発硬度の測定による劣化範囲の簡易な調査方法を考案した。そして、補修を行う際には、劣化部のコンクリートを除去する必要がある。そのため、ウォータージェットによる劣化部の除去工法を提案した。また、劣化部の補修においては、次の火災に備えた耐火性を有する材料が必要となる。一般にコンクリート構造物の補修には、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM と呼称）が用いられる。そのため、これまでに得られた知見に基づいて、PP 繊維を混入した PCM を用いた補修方法を提案した。これらの提案技術について、それぞれ RABT 曲線による耐火実験を行い、技術の妥当性について検証した結果、次のことを明らかとした。エコーチップ硬さ試験による反発硬度の測定結果を圧縮強度の測定結果や耐火実験による温度データから推定した強度と比較し、調査方法が妥当性であることを確認した。また、ウォータージェットの水圧と離隔距離を調節することで、劣化部のみを除去できることを確認した。さらに、補修方法として、酢酸ビニル・アクリル系の共重合樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を結合材の 5% 添加し、繊維度 17dtex×長さ 10mm の PP 繊維を 0.5vol.% 混入した PCM による吹付け工法や、アクリル系の樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を結合材の 1.3% 添加し、繊維度 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を 0.5vol.% 混入した PCM による部分的な補修に向けた左官仕上げ工法を提案した。耐火性を有する吹付けや左官仕上げ補修が可能であることを確認した。

これらの知見を用いて、シールドトンネルの覆工を対象としたセグメントおよび現場打ちコンクリートについて、具体的な耐火工の検討を行った。セグメントについては、対象とする設計基準強度を 48N/mm² とし、鋼繊維を 0.6vol.% 混入した耐久性や経済性に優れた鋼繊維補強高流動コンクリートへの適用を検討した。耐爆裂性の確保に効果的な繊維度 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を 0.2vol.% 混入することで、耐火性を付与したセグメントを提案した。現場打ちコンクリートに

については、市中のプラントよりベースコンクリートを出荷し、打込み場所にて所要の PP 繊維を混入する耐火コンクリートの供給方法を提案した。現場打ちコンクリートについては、できるだけ単位水量の低減を図るために、対象とする設計基準強度を 40N/mm^2 とし、繊度 17dtex × 長さ 20mm の PP 繊維を $0.1\text{vol.}\%$ 混入する耐火コンクリートを提案した。寸法の大きい部材や、圧縮応力の作用により爆裂が発生しやすくなるとの知見がある。そのため、実際の覆工を模擬した実規模の試験体を用いて、設計で考慮する 14N/mm^2 の圧縮応力を導入した状態で耐火実験を行い、RABT 曲線による加熱に耐えうる耐火性を検証し、要求性能を満足することを確認した。また、現場打ちコンクリートについては、実際の施工条件を模擬した施工実験を行い、所要の品質を満足する耐火コンクリートの供給方法および施工方法を確立した。

本研究の成果により、シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工の構築技術に関して、具体的な使用材料、配合を明らかとし、トンネル火災を想定した RABT 曲線による加熱に耐えうる耐火コンクリートや火災後の補修技術を提案した。新規に構築する覆工から、既存の覆工の維持管理に至るまで、総合的な耐火工の構築システムを開発した。本研究では、現状のシールドトンネルで主に用いられている材料や配合をもとに耐火性の検討を行ったが、耐火性は骨材や混和材の種類によっても変わる可能性がある。今後さらにデータの蓄積を行い、基準や指針類に反映し、汎用化していきたい。また、加熱条件として RABT 曲線を使用して研究を行ったが、車両の種類によっては加熱条件や火害の程度が変わるため、対策工の種類や補修に要する期間やコストが異なってくる。そのため、火災の規模に応じた耐火工の構築技術の整理が望まれる。さらに、土木構造物は、シールドトンネル以外にも橋梁、鉄道高架橋および山岳トンネルなど多岐にわたる。シールドトンネルとは構造形式、強度水準、火災の規模などが異なるため、使用材料、想定する加熱曲線および対策工の種類を変える必要がある。今後は、本研究で得られた知見を参考に、シールドトンネル以外の構造物への対策に展開していきたい。

目次

第 1 章 序論 - 1 -

1.1 研究の背景	- 1 -
1.1.1 シールドトンネルと車両火災	- 1 -
1.1.2 建築構造物の火災との取り組み	- 2 -
1.1.3 トンネル構造物の火災との取り組みと課題	- 3 -
1.2 研究の目的	- 5 -
1.3 本論文の構成	- 6 -
1.4 用語の定義	- 8 -
参考文献	- 10 -

第 2 章 既往の研究 - 13 -

2.1 はじめに	- 13 -
2.2 コンクリート構造物における耐火技術	- 14 -
2.2.1 規準・指針類の変遷	- 14 -
2.2.2 シールドトンネルの火害対策	- 16 -
2.2.3 耐火実験に用いる加熱曲線	- 18 -
2.3 有機繊維による耐爆裂性の確保技術	- 20 -
2.3.1 爆裂のメカニズム	- 20 -
2.3.2 有機繊維の混入による耐爆裂性の確保技術	- 22 -
2.4 繊維補強コンクリートの配合設計	- 27 -
2.4.1 普通コンクリートおよび高流動コンクリート	- 27 -
2.4.2 繊維補強コンクリート	- 28 -
2.5 火害を受けたコンクリートの補修技術	- 33 -
2.5.1 劣化部の調査方法	- 33 -
2.5.2 ポリマーセメントモルタルによる補修技術	- 34 -
2.6 まとめ	- 36 -
参考文献	- 37 -

第 3 章 耐爆裂性の確保技術 - 49 -

3.1 はじめに	- 49 -
3.2 実験概要	- 50 -
3.2.1 実験ケース	- 50 -
3.2.2 耐火実験用の試験体	- 50 -
3.2.3 耐火実験	- 51 -

3.3 最適な PP 繊維の提案（実験シリーズ I）	- 53 -
3.3.1 実験概要	- 53 -
3.3.2 実験結果および考察	- 58 -
3.4 強度水準に応じた PP 繊維の混入率の提案（実験シリーズ II）	- 64 -
3.4.1 実験概要	- 64 -
3.4.2 実験結果および考察	- 67 -
3.5 まとめ	- 76 -
参考文献	- 77 -

第 4 章 耐火コンクリートにおける配合の修正方法 - 79 -

4.1 はじめに	- 79 -
4.2 実験概要	- 80 -
4.2.1 実験ケース	- 80 -
4.2.2 使用材料，配合および練混ぜ方法	- 81 -
4.3 PP 繊維の混入が流動性の低下に及ぼす影響（実験シリーズ I）	- 83 -
4.4 スランプ管理のコンクリートの配合の修正方法に関する検討（実験シリーズ II）	- 85 -
4.4.1 実験概要	- 85 -
4.4.2 実験結果および考察	- 86 -
4.4.3 最適な細骨材率および単位粗骨材絶対容積の評価	- 92 -
4.5 高流動コンクリートの配合の修正方法に関する検討（実験シリーズ III）	- 93 -
4.5.1 実験概要	- 93 -
4.5.2 実験結果および考察	- 94 -
4.6 PP 繊維を混入する場合の配合の修正方法の提案	- 97 -
4.7 まとめ	- 100 -
参考文献	- 101 -

第 5 章 火害を受けた覆工コンクリートの補修技術 - 103 -

5.1 はじめに	- 103 -
5.2 火害による劣化部の簡易な調査方法の提案	- 104 -
5.2.1 エコーチップ硬さ試験機による調査方法の概要	- 105 -
5.2.2 実験項目および測定概要	- 106 -
5.2.3 耐火実験の概要	- 108 -
5.2.4 実験結果および考察	- 110 -
5.2.5 エコーチップ硬さ試験の妥当性の検証	- 114 -
5.3 耐火性を有する補修技術の提案	- 116 -
5.3.1 ウォータージェットによる劣化部除去工法	- 116 -
5.3.2 耐火性を有する吹付け工法	- 118 -

5.3.3 耐火性を有する左官仕上げ工法	- 123 -
5.4 まとめ	- 127 -
参考文献	- 128 -

第 6 章 覆工への耐火工構築技術の適用検討 - 131 -

6.1 はじめに	- 131 -
6.2 セグメントへの適用検討	- 133 -
6.2.1 鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントへの適用	- 133 -
6.2.2 セグメントの要求性能および確認項目	- 134 -
6.2.3 耐火性の検証概要	- 135 -
6.2.4 耐火性の検証結果	- 138 -
6.3 現場打ちコンクリートへの適用検討	- 141 -
6.3.1 シールドトンネルの拡幅部の概要と現場打ちコンクリートへの適用	- 141 -
6.3.2 現場打ちコンクリートの要求性能および確認項目	- 142 -
6.3.3 使用材料, 配合および製造	- 144 -
6.3.4 施工性の検証	- 146 -
6.3.5 耐火性の検証	- 151 -
6.4 まとめ	- 155 -
参考文献	- 156 -

第 7 章 結論 - 157 -

7.1 本研究の結論	- 157 -
7.2 今後の課題	- 161 -

謝辞 - 163 -

本研究に関連した論文リスト - 167 -

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 シールドトンネルと車両火災

シールドトンネルは、シールドマシンと呼ばれる鋼製の円筒機械の先端で掘削しながら地中を前進し、その機械の内部で覆工と呼ばれるリング状の構造体を連続して設置して、トンネルを構築するシールド工法により施工されるトンネルである。そのため、地上から掘削して構築する開削工法のトンネルとは異なり、地上部を供用しながら施工することが可能であるため、都市部のトンネルで広く利用されている。

シールド工法は、1800年代にフランスで開発された技術で、ロンドンのテムズ川の河底に構築する道路トンネルに初めて適用された。この工事では覆工にレンガが使用されたが、その後、欧米を中心に技術開発が進み、次第に鋳鉄、石材やコンクリート製のブロックなどが使用されるようになった。国内には、1900年代に羽越線の折渡トンネルに初めて導入された。また、本格的にシールド工法が適用されたのは関門鉄道トンネルであり、圧縮強度が60N/mm²程度のコンクリートを用いた鉄筋コンクリート製のブロックが使用された¹⁾。

シールドトンネルでは、一般にセグメントと呼ばれるブロックをリング状に組み立てて覆工を構築する。セグメントを大別すると、鉄筋コンクリート製セグメント、鋼製セグメントおよび合成セグメントの3種類があるが、耐圧縮性や耐久性、経済性に優れていることから、鉄筋コンクリート製セグメントを使用することが多い^{2),3)}。このセグメントには周辺の地山の土圧や水圧が作用し、軸方向の大きな圧縮力に耐える必要があり、高強度のコンクリートが使用されることが多い。近年、日本では、重要な都市部の社会インフラとして、交通混雑の緩和と円滑な高速道路のネットワークの形成のために、深さ40m以上の大深度地下にシールドトンネルが構築されており、圧縮強度40～60N/mm²程度の高強度の鉄筋コンクリート製セグメントが採用されている。

日本は、地震、津波、洪水、強風、土砂崩れ、火災といった自然災害に備えるため、高度経済成長期以降、安価で強度や耐久性が高い、鉄筋コンクリートを社会インフラに採用することで社会基盤を支えている。都市部のシールドトンネルの場合には、さらに、車両火災に対する備えが求められている⁴⁾。万が一シールドトンネル内で火災が発生した場合、特に損傷が大きくなるとトンネルの崩壊につながり、重要な都市部の社会インフラを喪失して社会に甚大な影響を及ぼすこととなる。また併せて、火災時の消火活動や避難環境も確保する必要がある。そのため、都市部に構築されるシールドトンネルの覆工では、車両火災による被害を防ぐための技術に焦点が当てられ、対策が求められている。

1.1.2 建築構造物の火災との取り組み

これまで、コンクリート構造物の耐火性に関しては、建築分野を中心に研究が重ねられてきた。もともと、日本は木造の建築物が主流であった。1923年に関東大震災が発生して、多くの木造家屋が焼失したのに対して、鉄筋コンクリート製の構造物の多くは原型を留めたため、コンクリート構造物は火災に強いとされ、関東大震災以降、鉄筋コンクリート製の建築物の建設が増えてきた。一方、海外も1800年代にフランスやアメリカなどで、近代化に伴い、当時多発していた火災に備えて鉄筋コンクリート製の住宅が作られるようになった。しかし、鉄筋コンクリートが長時間加熱を受けるとコンクリートの受熱温度の上昇により強度低下を招き、過大な変形を生じることが判り、加熱を受けたコンクリートの材料特性について研究が進められてきた。さらに、近代化に伴い、高強度コンクリートが使用されるようになり、首都圏を中心に30階以上の超高層共同住宅が急増し、150N/mm²クラスの高強度コンクリートが使用されるようになっている⁵⁾。

これまで、コンクリートは火災に強い材料とされてきたが、高強度コンクリートが火災などにより高温下に晒されると、爆裂と呼ばれるコンクリート片の剥離が発生しやすい。この爆裂が発生すると断面が欠損するだけでなく、コンクリート内部の温度がさらに上昇して、より強度低下を招くこととなるため、その抑制対策も求められる。そこで、コンクリート構造物が火災により高温履歴を受けても構造物の安全性を確保するには、強度低下や過大な変形の抑制が必要となる。そのためには、断面欠損を防止するための耐爆裂性やコンクリート内部の温度が許容温度を超えないための遮熱性が必要となる。

建築分野では、鉄筋コンクリート製の建築物を火災から守るために、ISO834 曲線⁶⁾を用いた耐火実験が数多く行われ、耐爆裂性や遮熱性についてさまざまな知見が得られている。建築基準法施行令や日本建築学会建築工事仕様書(以下、JASS5 と呼称)には、鉄筋の温度が許容温度を超えないよう部材に応じてかぶり厚さが規定され⁷⁾、この建築基準法の規定に基づき、旧建設省より告示が出され、RC 構造物の各部材の仕様と耐火時間の関係が規定された⁸⁾。学協会を中心に、耐火性に関する研究が重ねられており、高温環境下におけるコンクリートの化学的劣化や物性、爆裂のメカニズムに関する研究もなされており、爆裂が発生する要因などについてガイドブックに整理されている⁹⁾。また、爆裂を抑制するために、コンクリートに有機繊維が混入され、火災時に繊維が熔融・消失してできた空洞により、熱応力や水蒸気圧を緩和する対策が実用化されている¹⁰⁾。さらに、火災による損傷を受けた場合に構造体の補修技術も必要となるため、旧建設省建築研究所や日本建築学会が中心となり焼失したビルの調査を行い、火害の診断法や補強法が提案されている^{10), 11)}。近年では、耐爆裂性を有する補修材料の研究も進められている¹²⁾。

1.1.3 トンネル構造物の火災との取り組みと課題

土木分野では、建築分野に比べて火災事例が少ないことから、あまり火災に対する検討が行われてこなかった。土木分野の火災事例には、高架橋^{13)~16)}やトンネル¹⁷⁾の発生事例が挙げられる。消防白書によると、国内で年間3万件を超える火災事例の内、トンネル火災は30件程度であり、発生率は0.1%にも満たない¹⁸⁾。しかし、ひとたびトンネル内で車両火災が生じた場合、多数の犠牲者が発生するとともに、覆工コンクリートが閉鎖された空間で急速に加熱されるため、爆裂や強度低下の発生により、トンネルには甚大な被害が発生し、補修に莫大なお金と工期がかかることとなる。例えば、国内では1972年に北陸本線の北陸トンネルにおいて列車火災事故が生じ、多数の犠牲者を出した¹⁹⁾。また、1979年には東名高速道路の日本坂トンネルにおいて車両火災事故が発生し、覆工コンクリートの剥落などにより2か月間通行止めとなった²⁰⁾。海外では1996年にユーロトンネルで、2001年にゴットハルトトンネルで発生した大規模火災により多大な人的被害や経済的損失が発生した^{4), 21)}。

国内のトンネルでは、日本坂トンネル以降、大きな火災事故が発生しなかったため、トンネル火災に対する備えが取られてこなかった。2000年代に入ってヨーロッパでの耐火に関する考え方が導入され、都市部の沈埋トンネルやシールドトンネルでも火災に対する備えが取られるようになった⁴⁾。車両火災からトンネル構造物を守るためには、トンネル内に構築されている覆工コンクリートを高温加熱から保護する必要がある。そのため、その対策として、覆工コンクリートの上に耐火被覆が施されるようになった²²⁾。しかし、耐火被覆の構築は、材料自体が高価であり、施工に手間がかかるため、シールドトンネルにおいては、覆工コンクリート自体に耐火性を付与する研究がなされるようになった²³⁾。近年では、この耐火性を付与したセグメントが、都市部の高速道路を中心に実用化されており、火災に対する対策の主流になりつつある²⁴⁾。コンクリートに耐火性を付与するために、建築分野の知見を取り入れ、有機繊維の混入による耐爆裂性を確保する対策がとられている。特に有機繊維の中でも、化学的に安定であり、素材も柔らかく、比較的安価で入手しやすいことから、ポリプロピレン短繊維（以下、PP繊維と呼称）が使用されている²⁵⁾。

トンネル火災が発生した場合は、建築火災と比べてトンネル坑内の温度が急速に上昇するため、建築分野で用いられてきた加熱条件であるISO曲線で評価すると危険側の評価となる。そのため、ヨーロッパにおいて実規模の耐火実験が行われ、トンネル火災に対する耐火性を評価する加熱曲線が規定された。国内では2000年代に入って、大深度地下にシールド工法により構築する道路用のシールドトンネルには、ドイツで規定されたトンネル火災を想定した加熱条件であるRABT曲線を用いて耐火性の検証が行われるようになった。その後、RABT曲線を用いた耐火実験の研究事例も増えつつある²³⁾。耐火コンクリートの研究の変遷を表1-1に示す。

表 1-1 土木分野における耐火コンクリートの研究の変遷⁴⁾

年代	1960	1970	1980	1990	2000	2010
主要な火災事例		1972 北陸 トンネル	1979 日本坂 トンネル		1996 ユーロ トンネル	2003 テグ 地下鉄
					1999 モンブラン, タウエルトンネル	
対象コンクリート部材	普通コンクリート			高強度コンクリート, PC 合成部材, 繊維コンクリート		
研究開発事項	火災のRCへの影響 材料試験		沈埋トンネル部材, セグメントの耐火損傷 耐火試験, 数値解析			
主要な技術	火害診断補修		防火対策		耐火対策工	
設計火災曲線			ISO	炭化水素, JIS	RABT, RWS	

火災時にシールドトンネルの安全性を確保するには、建築構造物と同様に、主要な性能として覆工コンクリートが高温履歴を受けても爆裂により断面欠損しないことや、鉄筋が許容温度を超えないことなど、耐爆裂性と遮熱性の二つの性能が必要となる。

しかし、覆工コンクリートに耐爆裂性や遮熱性を確保するための、具体的な使用材料、配合、施工方法などの統一的な知見が少なく、使用者の判断に任されているのが現状である。そのため、シールドトンネルについて、RABT 曲線による加熱に耐えうる耐火性を確保するための具体的な覆工コンクリートの構築方法の研究が求められている。

ひとたびトンネル火災が生じた後は、覆工コンクリートが 1000℃を超える高温下に晒されて、表層部のコンクリートは強度低下を招くため、火災後の補修技術が必要となる。そこで、覆工コンクリートに求められる性能と同等の耐火性を有する補修材料が求められる。そのため、補修材料にも RABT 曲線による加熱に耐えうる耐爆裂性および遮熱性が必要となる。また、劣化部の補修を行うためには、補修を行う範囲を特定する必要があるため、劣化部の簡易な調査方法が求められる。

このように、シールドトンネルの覆工コンクリートの耐火性を確保するために、覆工に使用する材料選定、コンクリートの配合および維持管理方法までの一連のシステムが明らかとなっておらず、合理的な材料やシステムの構築方法についての研究が望まれている。

1.2 研究の目的

これまでに、建築分野を中心に高温環境下でのコンクリートの物性、爆裂のメカニズム、および有機繊維による爆裂の抑制対策について研究がなされてきた。近年、シールドトンネルにおいても、覆工コンクリート自体に耐火性を付与したセグメントに関して、学協会や発注機関からも指針類が発刊され、覆工に要求される性能や耐火性の検証方法も整理されており、実際の適用事例も増加している^{24),26)}。しかし、爆裂の抑制に必要なPP繊維の種類や混入率、PP繊維を混入する際の配合の考え方、火災後の補修材料や補修方法など、耐火工の構築に必要な具体的な方法に関して知見が少なく、施工方法がまとめられていない。コンクリート標準示方書や各種指針類にも、有機繊維の混入による爆裂の抑制効果について触れられているが、これらの詳しい方法は示されていない^{24),27)}。

そこで、1.1節に示した現状を踏まえ、本研究では、シールドトンネル内での車両火災事故に対する覆工の安全性の確保に向けて、覆工コンクリートに耐火性を付与するための使用材料や配合、覆工の構築に向けた施工方法、さらに火災後の維持管理までの総合的な耐火工の構築技術に関する具体的な手法を提案することを目的とした。最初に、RABT曲線による加熱に対して、耐爆裂性を確保するために強度水準に応じたPP繊維の種類や混入率について検討した。次に、所要のPP繊維を混入するための耐火コンクリートのける配合の修正手法について検討した。また、火災を受けたコンクリートの劣化部の調査点検手法や補修技術について検討を行った。そして、実際の覆工の構築を想定した施工方法により供試体を作製し、耐爆裂性や遮熱性の確認を行った。

1.3 本論文の構成

本研究は、シールドトンネルにおける車両火災事故に対する安全性の確保に向けて、PP 繊維の混入により、覆工コンクリート自体に RABT 曲線に耐えうる耐火性を付与するための使用材料や配合、覆工の構築に向けた施工方法、さらに火災後の維持管理までの総合的な耐火工の構築技術に関する具体的な手法を提案することを目的としている。本論文の構成を図 1-1 に示す。

「第1章 序論」では、本研究の背景および目的について示した。シールドトンネルの耐火工の構築技術に関して、社会的背景やこれまでの技術の変遷について説明し、本研究の重要性と位置づけについて示した。また、本論文の目的および論文の構成を示した。

「第2章 既往の研究」では、シールドトンネルにおける耐火工の構築技術について、これまでの耐火技術や各基準類の変遷を整理し、有機繊維の混入による耐爆裂性、短繊維を混入する際の配合設計方法、および劣化部の補修に用いる補修材料の耐火性に関する既往の知見を取りまとめた。そして、耐火工の構築技術の現状と問題点を整理し、本研究の位置づけと対象とする範囲について述べた。

「第3章 耐爆裂性の確保技術」では、PP 繊維の混入による耐爆裂性の改善方法に関して、トンネル火災を想定した RABT 曲線による耐火実験により、繊維の形状や混入率が爆裂に及ぼす影響について検討した。爆裂の抑制に効果的な最適な PP 繊維および強度水準に応じた PP 繊維の混入率を提案した。

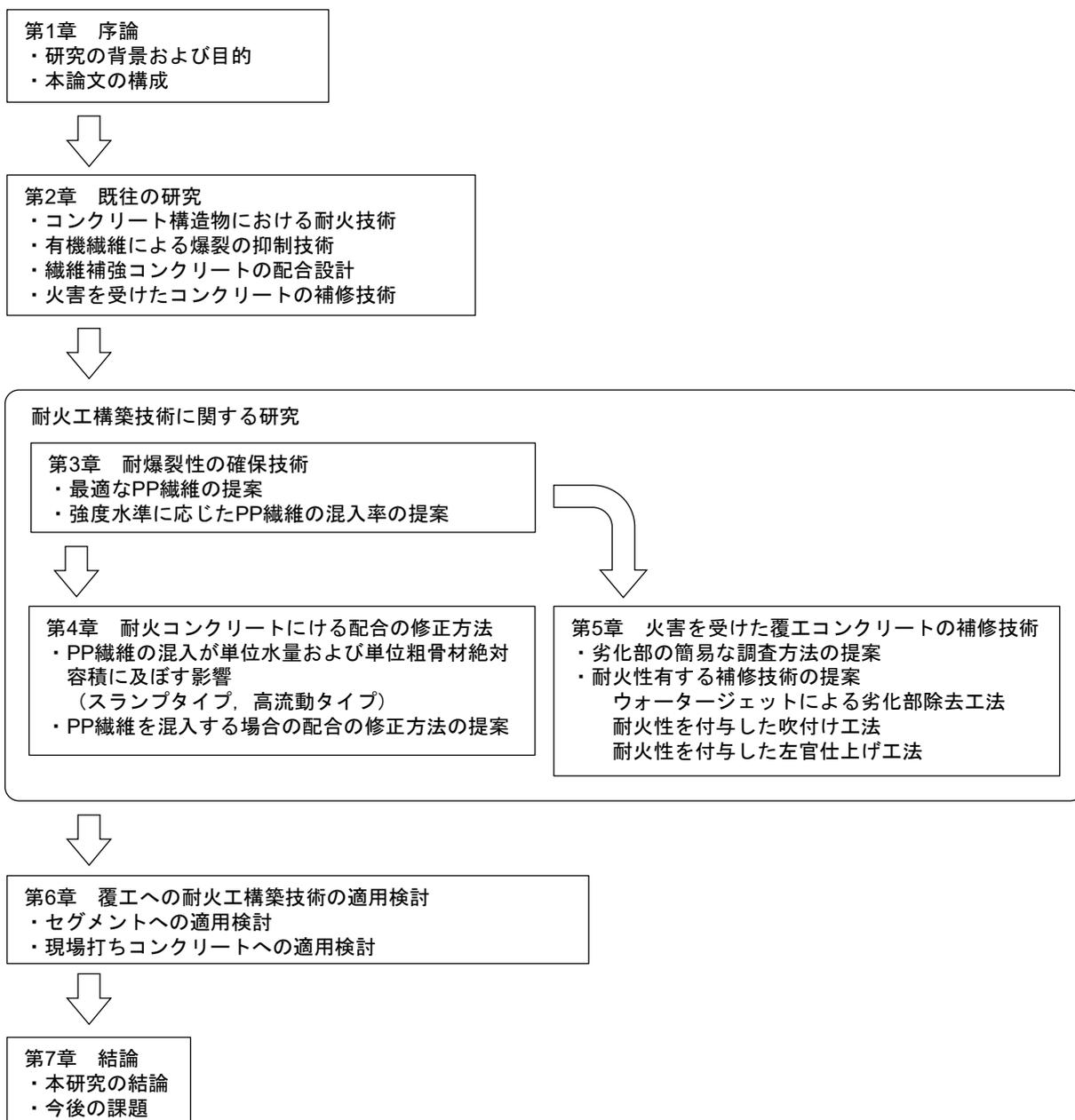
「第4章 耐火コンクリートにおける配合の修正方法」では、耐爆裂性の改善を目的として PP 繊維を混入する場合に、繊維の混入がフレッシュコンクリートの流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響について検討した。繊維の形状や混入率に応じて、単位水量および単位粗骨材絶対容積の補正量を定量化し、配合の修正方法を提案した。

「第5章 火害を受けた覆工コンクリートの補修技術」では、火害を受けたコンクリートの劣化部の調査点検手法および補修技術について、RABT 曲線による耐火実験により検討した。劣化深さの簡易な調査方法、劣化部を除去する方法、および耐火性を有するポリマーセメントモルタルを用いた吹付けや左官による補修方法を提案した。

「第6章 覆工への耐火工構築技術の適用検討」では、PP 繊維を混入したセグメントおよび現場打ちコンクリートに関して、実際に想定される断面力を導入した実規模の試験体を用いて耐火実験を行い、耐爆裂性や遮熱性の検証を行った。実工事に適用できる耐火性を有する覆工コンクリートの使用材料および施工方法を提案した。

「第7章 結論」では、本研究で得られた成果をまとめ、シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工の構築に必要な技術について提案した。総合的な知見を述べ、本研究の結びとした。

図 1-1 本研究のフロー



1.4 用語の定義

本論文で使用する用語のうち、特に繰り返して使用する用語、新たに用語として定義することで文意が理解しやすくなると考えられる用語について、以下のように定義する。

- (1) **シールドトンネル**：土圧や水圧に対抗して先端の切羽の安定を図りながら、掘削機械（シールド）を掘進させ、覆工を組み立てて地山を保持してトンネルを構築するシールド工法によって掘削されるトンネル。本論文では、特に車両事故などによる火災の発生の危険性が高く、耐火工の構築が求められる都市部の地下に構築される道路トンネルを対象とする。
- (2) **覆工**：シールドトンネル周辺の地山の土圧や水圧などの荷重に耐え、所定のトンネル内空を確保するための構造体。覆工には一次覆工と二次覆工があるが、本論文では、一次覆工を対象とする。
- (3) **覆工コンクリート**：覆工に用いるコンクリート。本論文では、特にシールドトンネルの覆工を形成するコンクリートを指し、セグメントおよび現場打ちコンクリートの2つを対象とする。
- (4) **セグメント**：シールドトンネルの一次覆工に用いる二次製品の部材をいう。一般に鉄筋コンクリート製、鋼製およびこれらを合成した製品などがあるが、本論文では、鉄筋コンクリート製を対象とする。
- (5) **現場打ちコンクリート**：現場にて打込みおよび締固めなどを行うコンクリート。本論文では、シールドトンネルにおいて、セグメントではなく、プラントにてコンクリートの製造を行い、現場にて打込みおよび締固めを行う覆工コンクリートを対象とする。
- (6) **火害**：火災により被った損傷。
- (7) **爆裂**：コンクリート部材が高温に晒されて、水蒸気圧や熱応力によって表面からコンクリート片が剥離し、爆発的にはじけ飛ぶことにより、断面が欠損する現象。
- (8) **耐爆裂性**：爆裂に対する抵抗性。
- (9) **遮熱性**：コンクリート部材が加熱された場合に、コンクリートや鋼材が許容温度を下回るためのコンクリート内部の温度上昇に対する抵抗性。
- (10) **耐火性**：火災から保護するためのコンクリートまたはモルタルの材料としての抵抗性。遮熱性、不燃性、耐爆裂性、変形に対する抵抗性などが含まれる。本論文では、特に耐爆裂性および遮熱性の2つの性能を対象とする。
- (11) **有機繊維**：爆裂を抑制するために混入する有機短繊維。
- (12) **PP 繊維**：有機繊維のうち、ポリプロピレン樹脂製の短繊維。
- (13) **繊維度**：繊維の太さを表す長さ重量との比。本論文では、1000m 当りの重量 (g) であるデンテックス (dtex) を使用する。
- (14) **換算直径**：繊維の断面を円形と仮定し、繊維度から算出した見掛けの直径。
- (15) **アスペクト比**：繊維の長細さの指標であり、繊維の長さを換算直径で除した縦横比。
- (16) **vol.%**：1m³ 当りのコンクリートに混入する短繊維の容積比。
- (17) **耐火被覆**：温度上昇によりコンクリートが損傷するのを防止するために、断熱性の材料で被覆すること。耐火被覆には、耐火吹付け、耐火板、ブランケットおよび塗装などがある。

- (18) **耐火工**：コンクリート構造物を火災から保護するために、耐火性を付与する対策工。耐火被覆をコンクリート表面に設置する方法とコンクリート自体に耐火性を期待する工法の2種類があるが、本論文では、PP 繊維の混入によりコンクリート自体に耐火性を期待する工法を対象とする。
- (19) **耐火コンクリート**：耐火性を付与したコンクリートおよびコンクリート部材。
- (20) **高強度コンクリート**：日本建築学会と土木学会とで定義が異なるが、本論文では、圧縮強度 36N/mm^2 以上のコンクリートを対象とする。
- (21) **耐火実験**：加熱履歴を与えることにより、耐火性を検証する実験。本論文では、トンネル火災を想定した RABT 曲線による加熱実験を対象とする。
- (22) **RABT 曲線**：ドイツで規定されているトンネル火災を想定した加熱曲線。5 分で最高温度の 1200°C まで昇温し、加熱開始から 30~90 分まで最高温度を保持し、110 分かけて降温する。本論文では、最高温度を加熱開始から 60 分まで保持する曲線を対象とする。
- (23) **爆裂深さ**：爆裂によって欠損した部分のコンクリート表面からの深さ。本論文では、コンクリート表面を 50mm 間隔の格子に分割し、その交点における測定値を対象とする。爆裂深さの最大値を最大爆裂深さ、爆裂深さの各測定値の平均を平均爆裂深さ、爆裂が認められた測定点数を全測定点数で除した値を爆裂面積率とする。
- (24) **受熱温度**：火災により熱を受けた場合のコンクリートの温度。本論文では、受けた熱履歴の内、最大の温度を指すこととする。
- (25) **スランプタイプ**：品質をスランプ試験で管理するコンクリートをスランプタイプと呼称する。本論文では、トンネルの覆工コンクリートで使用されるスランプが 15~18cm の軟練りコンクリートを対象とする。
- (26) **高流動タイプ**：品質をスランプフロー試験で管理する高流動コンクリートを高流動タイプと呼称する。
- (27) **ベースコンクリート**：爆裂を抑制するための PP 繊維を混入する前の、ベースとなるコンクリート。
- (28) **流動性**：打込みや締固めを行う際のコンクリートの変形のしやすさをいう。本論文では、流動性の指標は、スランプタイプについてはスランプ、高流動タイプについてはスランプフローとする。
- (29) **材料分離抵抗性**：コンクリートを構成する材料の分離のしにくさをいう。本論文では、セメントペーストまたはモルタルと、粗骨材との分離のしにくさを示す。
- (30) **単位水量**：コンクリートを 1m^3 製造する場合の練混ぜ水の使用重量。本論文では、PP 繊維の混入による流動性の低下を補うために、単位水量の増加を提案する。
- (31) **単位粗骨材絶対容積**：コンクリートを 1m^3 製造する場合の粗骨材の使用容積。本論文では、PP 繊維の混入による材料分離抵抗性の低下を補うために、単位粗骨材絶対容積の低減を提案する。

参考文献

- 1) トンネルコンクリートの歴史(鉄道シールドトンネル), 土木学会論文集, No.460, pp.7-11, 1993
- 2) 土木学会:セグメントの設計【改訂版】～許容応力度設計法から限界状態設計法まで～, トンネル・ライブラリー第23号, 2010
- 3) 土木学会:2016年制定トンネル標準示方書 [共通編]・同解説/シールド工法・同解説, 2016
- 4) 清宮理:耐火技術とコンクリートー土木ー, コンクリート工学 特集*耐火技術とコンクリート, Vol.45, No.9, pp.8-13, 2007
- 5) 百瀬晴基, 桜本文敏, 柳田克巳:ポリプロピレン繊維を混入した設計基準強度150N/mm²の超高強度コンクリートの耐火性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.995-1000, 2003
- 6) ISO 834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, 1999
- 7) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2003, 2003
- 8) 建設省:耐火構造の構造方法を定める件, 建設省告示第1399号, 2000
- 9) 日本建築学会:構造材料の耐火性ガイドブック, 2017
- 10) 菅原進一:耐火技術とコンクリートー建築ー, コンクリート工学 特集*耐火技術とコンクリート, Vol.45, No.9, pp.4-7, 2007
- 11) 建築研究所:焼けビルの耐力診断並びに補強-焼けビル調査総合報告, 建築研究報告, 1949
- 12) 一般財団法人日本建設業連合会:RC建築物のかぶり厚さの信頼性向上に関する研究, 2013
- 13) 藤岡靖, 川内康雄, 久門正和, 石田邦洋:火害を受けた高架橋の補修調査, 土木学会第58回年次学術講演会講演梗概集, VI-217, pp.433-444, 2003
- 14) 藤岡靖, 石田邦洋, 園山孝:火害を受けた高架橋の補修工事, 土木学会第58回年次学術講演会講演梗概集, VI-218, pp.435-446, 2003
- 15) 小川直仁, 佐野将義, 小西康人:火災を受けた高架橋における火害診断及び補修について, 土木学会北海道支部, 論文報告集, Vol.61, 2004
- 16) 小山堯:鉄道高架橋下火災事例, コンクリート工学 特集*耐火技術とコンクリート, Vol.45, No.9, pp.25-29, 2007
- 17) 社団法人日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書, 2002
- 18) 総務省消防庁:平成30年度版 消防白書, 2019
- 19) 西日本旅客鉄道株式会社安全研究所:あんけん～研究成果レポート～, Vol.10, 2017
- 20) 河村忠孝:日本坂トンネル内の車両火災事故とその復旧, セメントコンクリート, No.439, pp.108-111, 1983.9
- 21) 日経BP社:英仏海峡トンネル火災で深刻な構造被害, 日経コンストラクション, pp.20-21, 2008
- 22) 土木学会:コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集,

コンクリート技術シリーズ, No.63, 2006

- 23) 田嶋仁志：シールドRCセグメント構造の耐火技術と設計, コンクリート工学 特集*耐火技術とコンクリート, Vol.45, No.9, pp.61-66, 2007
- 24) 土木学会：トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針（案）, コンクリートライブラリー, No.143, 2014
- 25) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策, コンクリート工学 特集*耐火技術とコンクリート, Vol.45, No.9, pp.87-91, 2007
- 26) 首都高速株式会社：トンネル構造物設計要領（シールド工法編）, 第3編 耐火設計, pp.1-27, 2008.7
- 27) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, 2017

第2章 既往の研究

2.1 はじめに

都市部の地下に構築されるシールドトンネルにおいては、ひとたび車両火災が発生すると甚大な被害を受ける可能性が高い。そのため、車両火災に備えるために、覆工コンクリートに耐火工の構築が求められている。本研究では、覆工コンクリートに耐火性を付与するための使用材料や配合、覆工の構築に向けた施工方法、さらに火災後の維持管理までの総合的な耐火工の構築技術に関する具体的な方法を提案することを目的としている。

コンクリートの耐火性に関しては、これまでにさまざまな研究が行われている。高温履歴を受けたコンクリートの材料特性や爆裂の抑制技術、および加熱により劣化したコンクリート部材の点検・補修技術などに関して、これまでに得られた知見を取りまとめた規準や指針類も多数発刊されており、耐火工の構築の考え方、要求性能、想定する火災の規模、耐火性の検証方法などについても整理されている。

そこで、本章では、コンクリートの耐火性や耐火工の構築技術に関して、これまでの技術の変遷をまとめるとともに、有機繊維による爆裂抑制技術、繊維補強コンクリートの配合設計、および火災を受けたコンクリートの補修技術についての既往の研究成果を取りまとめた。そして、耐火工の構築に必要な、具体的な使用材料や配合などを提案するための課題を抽出することで、本研究の位置づけを明確にした。

2.2 コンクリート構造物における既往の耐火技術

2.2.1 規準・指針類の変遷

各学協会より発刊されている規準や指針類の一覧を表 2-1 に示す。建築分野においては、古くから建築物に対する耐火技術に関する研究がなされてきた。2000年に施行された建築基準法により、仕様規定から性能規定へと変わり、法令が整備され、性能評価を受けることとなった。日本建築学会では、建築工事標準仕様書（以下、JASS5 と呼称）が1997年に大幅に改定され、構造体および部材の要求性能の節が設けられ、耐火性に関する内容が盛り込まれた¹⁾。2003年にも改定が行われ、建築基準法の改正に伴い、記述が見直された²⁾。JASS5はその後2009年、2015年および2019年に改定が行われている^{3)~5)}。コンクリートの材料特性については、ガイドブックが発刊されており、耐火構造の設計法、火災時の化学変化や物理的特性、爆裂を引き起こすメカニズムなどについて取りまとめられている。このガイドブックは2004年に発刊されて以降、2009年および2017年に最新の情報を盛り込んで改定がなされている^{6)~8)}。また、建築構造物の中で数多く使用されている鉄筋コンクリート造や鉄骨造を中心に、火害診断およびその補修・補強方法について取りまとめられ、2002年に最初の指針案が発刊された⁹⁾。その後、火害調査や診断の需要が高まり、2010年に改定版が発刊され¹⁰⁾、さらに、2015年には指針化された¹¹⁾。

日本コンクリート工学会では、2000年に委員会が設置され、火災事例および関連文献の収集・整理が行われ、火災事例の特徴や問題点が整理された。耐火設計の目的、手順および対策方法について取りまとめられ、2002年に報告書が発刊された¹²⁾。その後、2009年にも委員会が設置され、火災の成長現象、火災時のコンクリートの化学的・物理的变化、コンクリート構造物の各種性能への火災の影響などについて、国内外の研究事例や制度・規格・法規などが調査された。コンクリート構造物の耐火設計手法や火害の調査・診断方法などの国内外の知見や課題が取りまとめられ、報告書が発刊された¹³⁾。さらに、2015年には、火災時のコンクリートの爆裂評価手法や、火害後のコンクリートの診断技術について検討するための委員会が設置され、新しく爆裂試験方法の提案や化学分析および非破壊試験による調査診断技術について取りまとめられた¹⁴⁾。

土木分野においては、建築分野に比べて火災事例が少なく、あまり検討されてこなかったが、日本コンクリート工学会の中で土木と建築で共通に評価できる体系が必要となり、土木分野に展開できる内容について委員会報告書に取りまとめられている^{12)~14)}。土木学会では、2002年にコンクリート構造物における火害や耐火技術の現状について調査するための委員会が発足した。また、コンクリート構造物の合理的な耐火実験方法や耐火設計手法の確立に向けた基礎的な知見が取りまとめられ、2004年に報告書が発刊された¹⁵⁾。それ以降、大深度地下への大規模トンネルのニーズが増加し、2012年には、トンネル構造物のコンクリートの火害安全性を確保するための合理的な耐火工の設計・施工指針（案）の作成に向けた委員会が発足し、2014年にその指針案が示された¹⁶⁾。しかし、示方書では、耐火性についてほとんど触れられていない。示方書〔施工編〕では、爆裂の抑制のために有機繊維を混入する場合の繊維の直径、長さ、混入率の大まかな範囲は記載されているが、繊維の種類、加熱条件および配合などの詳細については示されていない¹⁹⁾。

このように、各学協会を中心に、耐火工の構築の考え方、要求性能、想定する火災の規模、耐火性の検証方法などは整理されているが、具体的な使用材料、配合について、統一的な見解は得られていない。

表 2-1 規準・指針類の一覧

発刊年月	発行機関	タイトル	文献 番号
1997年1月	日本建築学会	建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事1997	1
2002年9月	日本コンクリート工学協会	コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書	12
2003年2月	日本建築学会	建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2003	2
2004年3月	日本建築学会	建物の火害診断及び補修・補強方法	9
2004年10月	土木学会	コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびに シンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ第63号	15
2004年11月	日本建築学会	構造材料の耐火性ガイドブック	6
2008年3月	土木学会	2007年制定コンクリート標準示方書[施工編]	17
2009年2月	日本建築学会	建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2009	3
2009年3月	日本建築学会	構造材料の耐火性ガイドブック	7
2010年2月	日本建築学会	建物の火害診断および補修・補強方法指針(案)・同解説	10
2012年5月	日本コンクリート工学会	コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する 研究委員会報告書	13
2013年3月	土木学会	2012年制定コンクリート標準示方書[施工編]	18
2014年6月	土木学会	トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針(案) コンクリートライブラリ第143号	16
2015年2月	日本建築学会	建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説	11
2015年7月	日本建築学会	建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2015	4
2017年3月	日本建築学会	構造材料の耐火性ガイドブック	8
2017年9月	日本コンクリート工学会	高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する 研究委員会報告書	14
2018年3月	土木学会	2017年制定コンクリート標準示方書[施工編]	19
2018年7月	日本建築学会	建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事2018	5

2.2.2 シールドトンネルの火災対策

建築構造物では、50年以上も前からコンクリート構造物の耐火性に関する研究が盛んに行われてきたが、土木構造物ではあまり研究されてこなかった。消防白書²⁰⁾によると、国内で年間3万件を超える火災事例の内、建物火災は50%を超えるが、車両火災は1%程度である。また、トンネル火災は年間30件程度であり、発生率は0.1%にも満たない。火災により被害を受けた土木構造物の大半はトンネルである。その中で、鉄道トンネルは数件であるのに対し、道路トンネルは年間20~30件前後の火災事例が報告されている。

シールドトンネル内で車両事故等による火災が発生した場合、可燃性の物質が閉鎖された空間で燃焼するため、急速に1000°C以上の高温に晒される可能性がある。トンネルの覆工コンクリートがこのような高温下に晒された場合、トンネルの崩壊に繋がりがかねない。国内では1979年に東名高速道路の日本坂トンネルで火災事故が発生した。この事故では大型トラック4台と乗用車2台の追突事故が原因で火災が発生し、コンクリートの表面は600~1000°Cまで上昇し、天井板の落下や覆工コンクリートの剥落などの被害を受け、2か月間通行止めとなった^{12),21)}。海外では、1949年にニューヨークのホランドトンネルにて積荷が燃えて火災が発生した。ヨーロッパでは、1996年にユーロトンネル、1999年にモンブラントンネルやタウエルントンネル、2001年にゴッドハルトトンネルなどで大規模な火災が発生し、多数の犠牲者が出た。補修や復旧に何か月もかかるとともに、多額の費用を要し、甚大な被害を受けた^{12),22)}。これらの火災事故を契機として、避難経路の確保、排煙設備の整備とともに、トンネルの覆工の耐火性を上げる研究が行われるようになった²³⁾。

その後、耐火吹付けや耐火版といった耐火被覆の設置が検討されるようになり、ヨーロッパでは、エルベトンネル、オスレンドトンネル、ウエスターシェルドトンネルなどのトンネルで覆工を保護するための耐火被覆が施された²³⁾。国内でも2000年代に入って、シールドトンネルの覆工コンクリートに耐火板や耐火吹付けといった耐火被覆の設置により、覆工コンクリートを保護する方法が取られるようになった¹⁶⁾。この耐火被覆によれば、火災を受けても覆工コンクリート自体は損傷を受けないため、火災を受けた後に新しい耐火被覆と取り換えることで、再び耐火性を確保することができるという長所がある。しかし、耐火被覆の構築は、材料自体が高価であること、覆工コンクリートの構築後に耐火被覆を設置するための工期が必要であること、および耐火被覆分の厚さが増えるためトンネル掘削断面が増加することにより、コストが増大することなどの短所が指摘されていた。そのため、シールドトンネルにおいては、覆工コンクリート自体に耐火性を付与する研究がなされるようになってきた²⁴⁾。この対策によれば、シールドトンネルの構築後に耐火被覆を施す必要がなくなるため、工期の短縮とコストの削減を図ることができる。近年では、都市部の高速道路を中心に、大深度地下にシールドトンネルが構築されるようになり、耐火工の適用が進められており、この方法が火災に対する対策の主流となりつつある¹⁶⁾。

土木学会の指針案¹⁶⁾や首都高速道路の設計要領²⁵⁾に示されている耐火工の設計のフローを図2-1に示す。耐火工の火災時の要求性能として、トンネルを崩壊させないために、過大な変形を生じないように爆裂に対する抵抗性を付与することや、着目する部位が許容温度を下回るための遮熱性を確保することなどについて、実規模の耐火実験により確認するよう示されている。

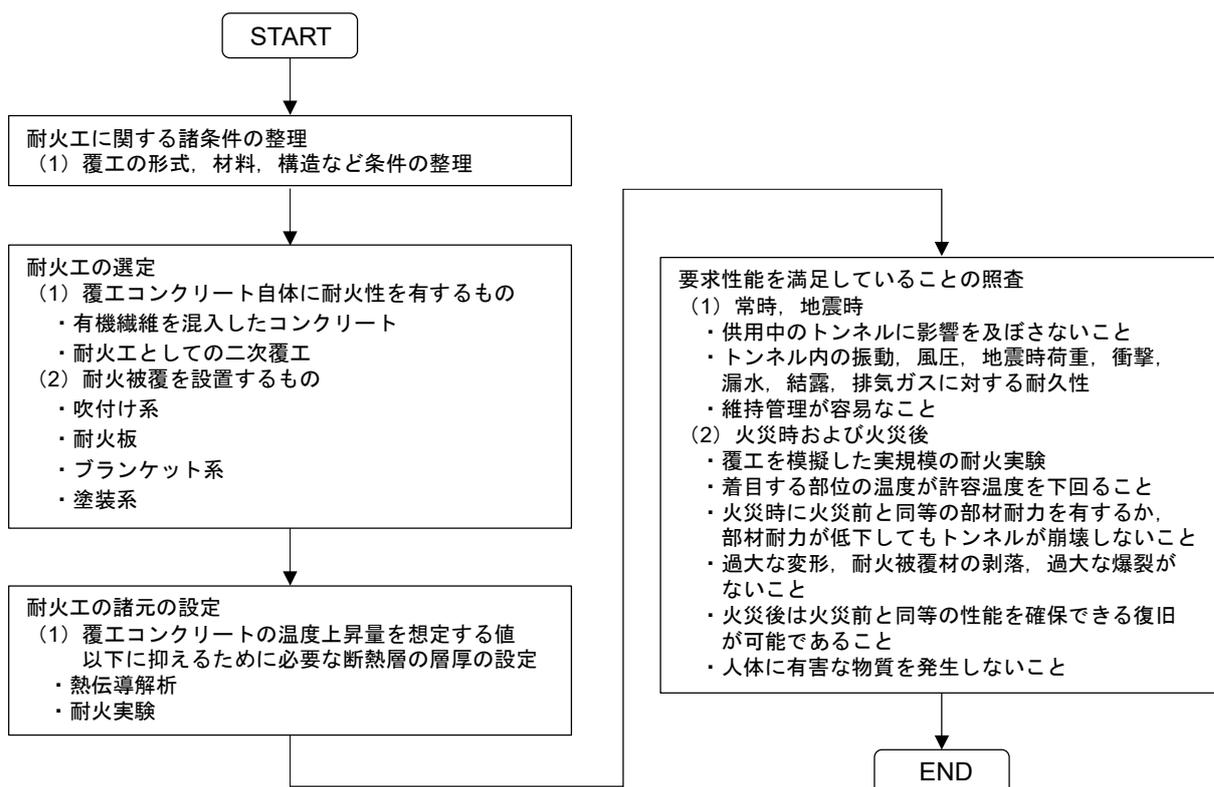


図 2-1 耐火工の設計のフロー

2.2.3 耐火実験に用いる加熱曲線

耐火実験に使用する加熱曲線には様々なものがある^{12), 13), 15), 16)}。加熱曲線の種類および概要を図 2-2 および表 2-2 に示す。火災の規模は、火災時の温度と火災の継続時間で決定され、想定される火災の規模に応じた適切な加熱曲線を選定する必要がある。

建築構造物では、建築基準法に ISO 曲線に準拠した性能評価試験を行うよう規定されている。ISO 曲線は、温度上昇が比較的緩やかであるが、トンネル構造物においては、車両事故等により閉鎖された空間で可燃物が燃焼するため、急速に温度が上昇する。そのため、トンネル構造物については、大規模火災を想定して、RABT 曲線や RWS 曲線が採用されることが多い。普通自動車などの小規模火災で 400℃程度、バスや小型トラックなどの中規模火災で 700℃程度であるが、燃焼しやすい可燃物を載せた大型トラックやタンクローリーなどの大規模火災となると 1000℃を超えると報告されている。実際のトンネル内で車両を用いた火災実験により、温度履歴が RABT 曲線と同様な履歴となることが示されている¹²⁾。

首都高速道路株式会社の設計要領では、この RABT 曲線が採用されている²⁵⁾。首都高速道路の場合は、危険物積載車両の通行を制限している。大型トラック、バス、可燃物積載車両などの 90～100MW 相当の危険物性記載車両でない大型車の延焼に対応する火災曲線は、最高温度が 1100℃の HC 曲線とされているが、首都高速道路は幹線道路であり、重要性が高いことから安全率を見込んで最高温度を 1200℃としている。また、消火活動に要する時間や国内外のトンネル火災事例の報告より火災時間は 60～120 分程度であることから、RABT 曲線の中で最高温度を 60 分まで保持する曲線が採用されている²⁶⁾。

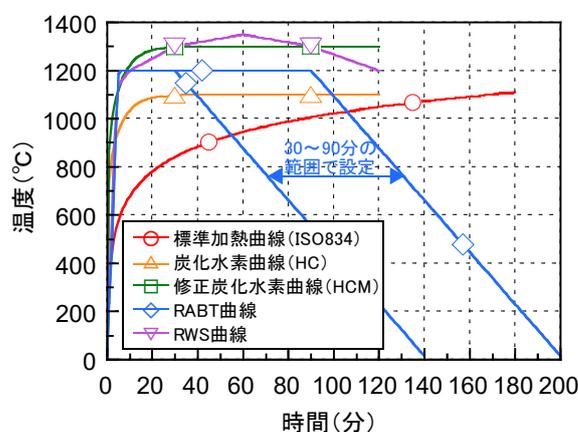


図 2-2 耐火実験に用いられる各種の加熱曲線

表 2-2 各種加熱曲線の種類および概要^{12), 13), 15), 16)}

加熱曲線の種類	概要
ISO 曲線 ²⁷⁾	<p>ISO834 による加熱曲線</p> <p>世界的に広く用いられており、自然火災による換気制御モデルとなっている。国内では、建築分野に適用されており、建築基準法にて、耐火構造についての技術基準に適合しているかを ISO834 に準拠した性能評価試験を行うよう規定されている。</p> <p>$T=345 \log_{10} (8t+1) +20$ ただし、T: 炉内平均温度 t: 試験経過時間 (分)</p>
HC 曲線 ²⁸⁾	<p>炭化水素燃焼曲線 (Hydrocarbon curve)</p> <p>小さな石油火災を想定した加熱曲線。自動車の燃料タンク、ガソリンまたは石油タンカー、特定の化学タンカーなどに適用できる。</p> <p>$T=20+1080 (1-0.325 \cdot e^{-0.167t}-0.675 \cdot e^{-2.5t})$</p> <p>ただし、$T$: 炉内平均温度 t: 試験経過時間 (分)</p>
RABT 曲線 ²⁹⁾	<p>ドイツ基準の RABT (Richlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln : 道路トンネルの設備と運用のための指針) による加熱曲線</p> <p>油火災を想定した曲線であり、燃焼時間は対象とするトンネルの重要度や消火活動の時間等を総合的に考慮して 30 分～90 分の範囲で設定される。加熱曲線は、終日無規制でトンネル内の通行可能な木製家具を 2t 相当積載した車両から火災が発生した場合を想定し、火災実験 (1995.10) により制定された。5 分で最高温度の 1200℃まで昇温し、最大温度を 30～90 分まで保持した後、110 分で降温する。</p>
HCM 曲線	<p>修正炭化水素燃焼曲線 (Hydrocarbon modified curve)</p> <p>可燃性物質、液体、液化物質などが積載された車両の火災で、10 分以内に 1200℃に達し、その 20 分後に最高温度の 1300℃に到達する火災を想定している。ただし、このような急激な火災は、120 分以上は継続しないとされている。曲線は、HC 曲線を 1280/1080 倍して設定されている。主にフランスで使用されている。</p> <p>$T=20+1280 (1-0.325 \cdot e^{-0.167t}-0.675 \cdot e^{-2.5t})$</p> <p>ただし、$T$: 炉内平均温度 t: 試験経過時間 (分)</p>
RWS 曲線 ³⁰⁾	<p>オランダ基準の RWS (Rijkswaterstaat : オランダ運輸公共事業省治水本局) による加熱曲線</p> <p>閉鎖空間における油火災をモデル化している。対象とした加熱曲線は、ガソリン積載量 45kl のタンクローリー火災において、ガソリンが約 150m²の面積に拡散すると仮定している。加熱曲線は、1979 年に TNO (オランダ応用科学研究機構) による加熱実験で制定された。</p> <p>0 分 : 20℃, 3 分 : 890℃, 5 分 : 1140℃, 10 分 : 1200℃, 30 分 : 1300℃, 60 分 : 1350℃, 90 分 : 1300℃, 120 分 : 1200℃</p>

2.3 有機繊維による耐爆裂性の確保技術

2.3.1 爆裂のメカニズム

爆裂とは、コンクリートが加熱履歴を受けた際に、表層のコンクリート片が剥離し、はじけ飛ぶ現象を言う。日本コンクリート工学会の委員会報告には、表層部が爆発的に剥離・剥落する現象と記されており¹³⁾、土木学会の指針案には、コンクリートが高温に爆されて、水蒸気圧や熱応力によって表面から損傷が進行し断面が欠損する現象と定義されている¹⁶⁾。爆裂のメカニズムについては、古くから研究がなされており、主なメカニズムとして、水蒸気圧説と熱応力説が挙げられる³¹⁾。

水蒸気圧説とは、コンクリート中に水和に使用されていない自由水が存在し、加熱によりこの自由水が蒸発する際に体積が膨脹し、コンクリートの表層部の細孔に非常に大きな水蒸気圧が発生して、その膨脹圧がコンクリートの引張強度を超えると表層部のコンクリートを剥離・剥落させるという説である。水蒸気圧説については、1965年にHarmathy³²⁾が提唱している。Hert³³⁾は、コンクリートの含水率が低い場合には爆裂が起こる可能性が低く、熱応力説だけでは説明できないと報告している。また、小澤ら^{34)~36)}は、加熱供試体中の蒸気圧を計測し、局所的な蒸気圧の上昇が爆裂原因となりえることを確認している。長尾ら^{37),38)}は、爆裂に関わる高温下でのコンクリート中の水分移動特性について研究している。高正ら³⁹⁾は、水分移動が活発になると、コンクリート中の水蒸気圧が緩和されるが、水分移動が抑制されると急激な水蒸気圧の上昇により、爆裂が生じる可能性が高まると報告している。さらに、米澤ら⁴⁰⁾は、爆裂を生じる場合は水分の移動がほとんど認められないのに対して、爆裂しない場合は外部に水分が逸散していることを確認している。高温時の平衡水分量および空隙量の変化を測定し、空隙の未充填率に応じた水蒸気圧と超臨界水圧により爆裂が発生するとしている。兼松ら^{41)~44)}は、中性子ラジオグラフィを用いて加熱中の水分挙動を確認し、表層部に爆裂の原因となる水分溜りが発生することを確認している。

熱応力説とは、コンクリートの表層部が加熱履歴を受ける場合、表層部は温度の上昇に伴い急速に膨張しようとするが、内部のコンクリートの温度の上昇は緩慢である。そのため、熱膨張ひずみが内部のコンクリートに拘束され、表層部のコンクリートに圧縮応力が発生する。この圧縮応力が圧縮強度より大きくなると表層部のコンクリートが剥離・剥落するという説である。熱応力説については、1966年に斎藤⁴⁵⁾が、部材内部の熱応力がコンクリートの圧縮強度以上に達して圧縮破壊することについて理論的に説明している。古村ら⁴⁶⁾は、解析による検討を行い、加熱面に垂直な引張応力が発生する可能性を示唆している。また、宋ら^{47),48)}は、解析と実験との比較を行い、加熱初期の温度と熱応力の変化により爆裂を誘起する可能性を示唆している。

長尾ら^{49),50)}、Consolazioら⁵¹⁾およびZeimlら⁵²⁾は、水蒸気圧と熱応力の両者の複合作用によって発生するとしている。小澤および谷辺ら^{53)~64)}は、水蒸気圧の測定と外部に設置した拘束リングのひずみから熱応力を算出し、実験と解析から耐爆裂性の評価を行い、水蒸気圧と熱応力の複合作用について研究を重ねている。これらの研究で得られた知見が指針¹⁴⁾に取りまとめられており、耐爆裂性の試験法として規定された⁶⁵⁾。爆裂のメカニズムの概念図⁵⁷⁾を図2-3に示す。現在もメカニズムの解明に向けて精力的に研究が行われており、メカニズムが明らかとなりつつある。また、爆裂の発生要因に関して1970年代前後に研究がなされており、ガイドブック⁸⁾に変遷が詳しくまとめられており、次のような特徴が記されている。

(爆裂の促進条件)

- ・耐火実験の初期に生じやすい。爆裂が生じている時間は概ね5~30分に集中し、概ね60分後には終了する。
- ・加熱昇温速度が速いほど、確率が高くなる。
- ・コンクリートの含水率が高いほど、爆裂を発生する確率は高くなる。
- ・骨材の岩種やコンクリートの調合が爆裂に影響する。
- ・水結合材比が小さいほど爆裂を生じやすく、爆裂深さや爆裂面積は大きくなる。
- ・コンクリート部材の形状や大きさも重要な要因であり、断面寸法が大きい部材ほど爆裂による断面欠損が大きくなる。
- ・外部から与えられる荷重による応力が増加すると、爆裂を発生する可能性は高くなる。
- ・プレストレストコンクリート部材においては、導入プレストレスが大きいほど爆裂を生じやすく、I形梁の薄いウェブも爆裂を起こしやすい。
- ・構造部材の隅角部における鉄筋の集中箇所は、爆裂の危険性を増大させる。

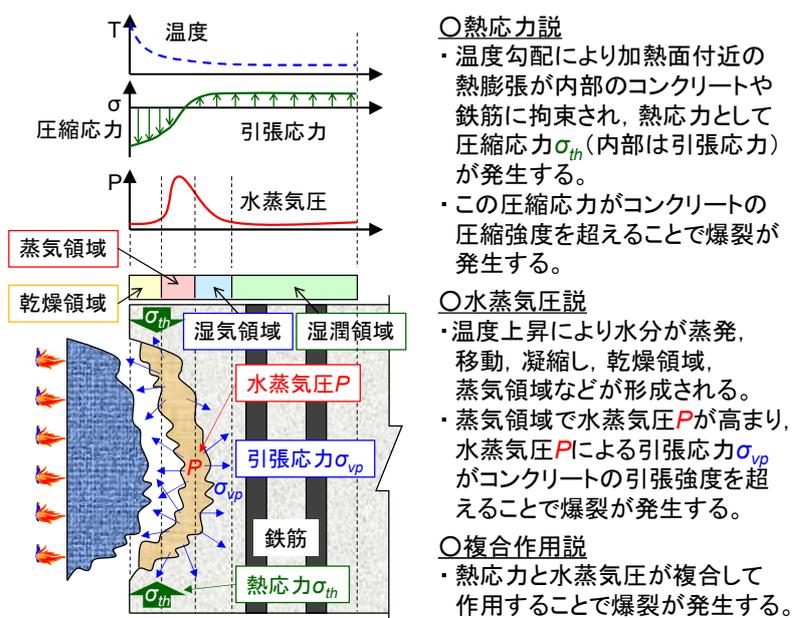


図 2-3 3種類の爆裂のメカニズムの概念図⁵⁷⁾

2.3.2 有機繊維の混入による耐爆裂性の確保技術

コンクリートの耐爆裂性を確保するために、有機繊維の混入による爆裂抑制対策が挙げられる。有機繊維の混入による爆裂抑制対策は、1993年に Sarvaranta ら⁶⁶⁾がポリアクリルニトリル繊維とPP繊維の2種類の繊維を用いて、爆裂との関係について調べている。その後、主に建築分野を中心に検討がなされてきた。建築構造物では高強度コンクリートを使用することが多い。強度が高いほど、爆裂が発生しやすいとされており⁸⁾、爆裂が課題とされてきた。1997年制定のJASS¹⁾では、60N/mm²を超える高強度コンクリートについては耐火性を事前に検討すべき旨が記載された。有機繊維の種類として、融点が低く、比較的安価であることから、PP繊維による爆裂抑制対策に関する研究が進められている。山崎ら⁶⁷⁾の研究以降、国内でも盛んに研究がなされており^{68)~79)}、海外でも研究事例が増えている^{80)~88)}。

PP繊維の他にも有機繊維の耐爆裂性に関する研究がなされている。長尾ら⁵⁰⁾はビニロン繊維の混入により爆裂を抑制できると報告している。小澤ら^{89)~94)}は、水溶性のビニロン繊維やストロー構造である天然繊維のジュート繊維について研究を重ねており、爆裂抑制効果が高いことを報告している。ナイロン繊維については、韓ら⁷³⁾や崔ら⁷⁹⁾はPP繊維と同程度の爆裂抑制効果を有しているとし、李ら⁷⁴⁾は、PP繊維より爆裂抑制効果に優れると報告している。また、有機繊維以外では、浦野ら⁹⁵⁾は、鋼繊維の混入により爆裂深さが小さくなると報告している。高橋ら⁹⁶⁾は、低環境負荷で引張強度や耐熱性に優れる玄武岩由来のバサルト繊維について検討しているが、加熱時に膨張し、破壊要因になる可能性がある旨報告している。

シールドトンネルにおける覆工コンクリートの耐火性に関して、2000年代からトンネル火災を想定したRABT曲線による耐火実験事例が報告されている。シールドトンネルのセグメントや山岳トンネルの二次覆工を模擬した平板試験体を用いて爆裂の検証を行い、PP繊維の爆裂抑制効果について報告している^{97)~102)}。部材の大きさが増加したり、圧縮応力が作用すると爆裂が生じやすくなるとの知見があり^{8), 97)}、実際のセグメントと同等の実規模の試験体を用いて、セグメントに作用する断面力を導入した耐火実験や熱伝導解析、熱応力解析により火災時の挙動を評価している^{25), 103)~106)}。

既往の知見では、配合、繊維の形状および加熱条件などが異なっており、どの繊維が効率的に爆裂を抑制できるのか体系的に整理されていない。しかし、PP繊維の混入による耐爆裂性に関する研究は数多くなされており、融点が低く爆裂抑制効果に優れることが示されている。また、汎用的に使用されており入手しやすいこと、比較的柔らかく施工性が良いことなどの観点からもPP繊維を使用することが望ましいと考えられている。しかし、RABT曲線による研究事例が比較的少ないこと、繊維の種類や混入率に着目して、最適な繊維の混入方法に言及した研究事例は少ないのが現状である。有機繊維による耐爆裂性に関する既往の研究の一覧を表2-3～表2-6に示す。

表 2-3 有機繊維による爆裂抑制対策に関する既往の知見（その1）

No.	繊維の種類※	繊維の形状			繊維の混入率 (vol.%)	結合材の種類	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位結合材量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	試験体の寸法 (mm)
		換算直径 (μm)	長さ (mm)	アスペクト比							
1	PVA	—	—	—	0, 1, 2.5	N+SiF	22.0	160	727.0	98~102	幅500×長さ500 厚さ150, 200, 300の平板
2	PP	48	10	208	0, 0.1, 0.2	N+SiF	15.0	150	1000	172~193	Φ150×L300の円柱
							20.0	150	750	158	
		25.0	150	600	142						
		15.0	150	1000	191						
		15.0			191						
		15.0			181						
3	PP	60	30	500	0, 0.2, 0.3	N	35.0	170	486	60以上	Φ100×L200の円柱 縦100×横100×長さ400の角柱
4	PP	—	—	—	0, 0.1	N+BS	34.0	147	432	72	幅1200×長さ3600×厚さ450の平板
5	PP	64	12	188	0, 0.1, 0.2, 0.3	N+BS	34.0	141 ~155	414 ~454	72~76	幅550×長さ1000×厚さ300の平板
6	PP	18	10	556	0.13, 0.16	—	—	—	—	62~63	幅800×長さ800×厚さ300
7	PP	40	19	475	0.05, 0.1, 0.15	N+FA+SiF	25.0	160	640	60~80	Φ100×L200の円柱
8	PP	110	3	27	0.15	H	30.0	132	440	68~75	幅400×長さ400×厚さ100の平板
		110	12	109	0.15						
	PE	12	12	1000	0.0375, 0.15		28.0	123	440	74~78	
9	PP	40	19	475	0, 0.025, 0.05, 0.075	C+FA+SiF	28.9	162	562	86~95	Φ100×L200の円柱
	NY	12	12	1000						82~90	
10	PVA	12	4	333	0.15	N	30.0	170	567	77	幅400×長さ400×厚さ100の平板
	Jute	10~ 30	12	400~ 1200	0.075					74	
11	PP	49	10	204	0, 0.1	N+SiF	20.0	213	1066	143	縦70×横70×長さ200の角柱
						N	50.0	263	525	42	
12	PP	18	10	556	0.165	N+BS	34.8	167	480	62~68	幅800×長さ800×厚さ250の平板
							31.5	167	530	68~79	
							26.5	140	530	88	
							167	630	88~95		
13	PP	110	12	109	0, 0.1	N+SiF	18.0	160	889	—	—
14	PE	12	12	1000	0, 0.15, 0.25	N+BS+SiF	12.5	150	1200	—	縦100×横100×長さ200の角柱
	PP	20	12	600							
		40	12	300							
	NY	20	12	600							
40		12	300								
15	Jute	10~ 30	3	150	0.19	N+SiF	19.0	208	1095	152	Φ50×L100の円柱
			12	600						141	
	PVA	12	4	333						150	
	PP	42	12	286						139	
16	PP	49	20	408	0.22	—	35.5	150	423	—	幅600×長さ1000×厚さ200の平板
							49.4	153	310	—	
17	PP	49	10	204	0.20	N+SiF	20.0	155	775	147	縦200×横200×長さ600の角柱

※繊維の種類:PVA(ビニロン繊維), PP(PP繊維), NY(ナイロン繊維), Jute(ジュート繊維), PE(ポリエチレン繊維), BA(バサルトル繊維)

表 2-4 有機繊維による爆裂抑制対策に関する既往の知見（その2）

No.	繊維の種類※	加熱条件	爆裂の程度	文献番号	文献年度	備考
1	PVA	JIS A 1304-180min	(最大爆裂深さ) 繊維無し:60mm, 1%:30mm, 2.5%:20mm	52	1996	
2	PP	ISO834-60min	<ul style="list-style-type: none"> ・水結合材比の低下に伴い爆裂による損傷が増大 ・PP繊維の混入量の増加に伴い爆裂による損傷を低減 ・PP繊維が長く、また細いものほど爆裂による損傷を低減 ・Φ48μm×L10mmの繊維:0.2vol.%で爆裂を抑制 ・Φ48μm×L20mmの繊維:0.1vol.%で爆裂を抑制 ・Φ18μm×L10mmの繊維:0.1vol.%で爆裂を抑制 	72	2003	
3	PP	200°C-120min 400°C-120min 600°C-120min (10°C/min)	・PP繊維の混入により爆裂を抑制	74	2005	・鋼繊維とのハイブリッド 鋼繊維0.8vol.%+PP繊維0.2vol.% 鋼繊維0.7vol.%+PP繊維0.3vol.%
4	PP	RABT60	・PP繊維の混入により爆裂を抑制	183	2005	断面力を作用させながら耐火試験
5	PP	RABT60	・繊維を0.2vol.%以上混入することで爆裂を抑制	103	2007	
6	PP	RABT60	・局所的な剥離のみ	104	2007	
7	PP	ISO834-60min	・繊維を0.1vol.%以上混入することで爆裂を抑制	76	2007	
8	PP	最高温度 1200°C (1200°C/h)	・Φ110μm×L12mmの繊維を 0.15vol.%混入することで爆裂を抑制	39	2008	
	PE					
9	PP NY	ISO834-60min	・PPおよびNY繊維ともに0.075vol.% 混入することで爆裂を抑制	77	2009	
10	PVA Jute	RABT20	・PVA繊維を0.15vol.%混入することで爆裂を抑制 ・Jute繊維を0.075vol.%混入することで爆裂を抑制	93	2010	
11	PP	ISO834-30min	<ul style="list-style-type: none"> ・水結合材比20%の場合、繊維を0.1vol.% 混入することで爆裂を抑制 ・水結合材比50%の場合、繊維を 混入しなくても爆裂は発生しない 	43	2010	
12	PP	RABT60	<ul style="list-style-type: none"> ・繊維を0.165vol.%混入することで軽微な爆裂に抑制 ・単位水量が小さいほど、水結合材比が小さいほど 爆裂を抑制 	105	2010	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼繊維とのハイブリッド 鋼繊維0.4vol.%+PP繊維0.165vol.% ・圧縮応力を18~20N/mm²作用
13	PP	1000°C-10min (1000°C/30s)	・繊維を0.1vol.%混入することで爆裂を抑制	45	2012	
14	PE PP NY	ISO834-60min	<ul style="list-style-type: none"> ・NY繊維を0.25vol.%混入することで爆裂を抑制 ・繊維の直径が小さい繊維の方が爆裂による損傷が小さい ・爆裂の程度:NY繊維<PP繊維<PE繊維 	78	2012	
15	Jute PVA PP	400°C-30min 600°C-20min 800°C-15min	<ul style="list-style-type: none"> ・加熱温度が高くなるほど、爆裂による損傷が増大 ・繊維の混入により爆裂による損傷を低減 ・長さ12mmのJute繊維を0.19vol.%混入することで 軽微な爆裂に抑制 	94	2012	
16	PP	1200°C-RABT60 800°C-60min 400°C-60min	<ul style="list-style-type: none"> ・水結合材比49.4%の場合、 繊維を混入しなくても爆裂は発生しない ・400°Cの加熱においては、爆裂は発生しない ・1200°Cの加熱において、 繊維を0.22vol.%混入することで爆裂を抑制 	106	2012	
17	PP	ISO834-60min	・繊維を0.20vol.%混入することで爆裂を抑制	79	2012	

※繊維の種類:PVA(ビニロン繊維), PP(PP繊維), NY(ナイロン繊維), Jute(ジュート繊維), PE(ポリエチレン繊維), BA(バサルト繊維)

表 2-5 有機繊維による爆裂抑制対策に関する既往の知見（その3）

No.	繊維の種類※	繊維の形状			繊維の混入率 (vol.%)	結合材の種類	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位結合材量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	試験体の寸法 (mm)		
		換算直径 (μm)	長さ (mm)	アスペクト比									
18	PP	25×110	3	51	0.2	-	17.0	155	912	140	幅215×長さ373×厚さ60の平板		
			12	203						146			
		41	6	146						144			
			12	293						143			
		23	12	522						0.1, 0.2		157	
19	PP	42	12	286	0.19, 1.0	-	13.6	180	1322	210	Φ50×L100の円柱		
	Jute	10~30	12	600	0.19					210			
	PVA	4	333	0.19	210								
		12	1000	0.19	190								
20	Jute	50	12	600	0, 0.075	N	30.0	170	567	67~74	幅400×長さ400×厚さ100の平板		
	PP	110	12	109	0, 0.075, 0.15					57~64			
21	Jute	10~30	12	600	0.05, 0.1, 0.2, 0.3	-	13.6	180	1322	169~182	Φ50×L100の円柱		
	PP	42	12	286	0.1, 0.2					187~189			
22	PP	43	12	279	0, 0.2	H	30.0	150	500	93~96	拘束リング試験体 Φ300×H100		
					0, 0.5	-	13.6	180	1322	189~209			
23	Jute	10~30	12	600	0, 0.3, 0.5	-	15.3	196	1278	170~227	Φ50×L100の円柱		
	PP	42	12	286						184~227			
24	PP	50	10	200	0.1	M	23.5	-	-	121~124	縦450×横450×高さ3500		
25	PP	12	12	1000	0, 0.15, 0.25	N+FA+SiF	20.0	150	750	101	縦100×横100×長さ200の角柱		
							14.5			983		149	
							12.5			1140		205	
							N+FA+SiF			20.0		750	101
							N+BS+SiF			14.5		983	149
12.5	1140	205											
26	PP	43	12	279	0, 0.20	H	30	150	500	76~83	拘束リング試験体 Φ300×H100		
27	BA	13.2	21.9	1659	0, 0.1, 0.15	N+SiF	15	165	1100	90~100	円柱		
	PP	64.8	12	185	0.15					-			
28	PP	-	12	-	0.2	N	32	145	450	76	拘束リング試験体 Φ300×H100		
29	Jute	50	12	600	0.1	N	30.0	150	500	90	拘束リング試験体 Φ300×H100		
	PP	110	12	109						100			

※繊維の種類:PVA(ビニロン繊維), PP(PP繊維), NY(ナイロン繊維), Jute(ジュート繊維), PE(ポリエチレン繊維), BA(バサルト繊維)

表 2-6 有機繊維による爆裂抑制対策に関する既往の知見（その4）

No.	繊維の種類※	加熱条件	爆裂の程度	文献番号	文献年度	備考
18	PP	独自曲線 (JIS A 1304より 初期の昇温速度 遅い)	・繊維の断面積が小さいほど、爆裂の抑制効果が高い。 ・繊維長については、優位な傾向は見あたらなかった。	80	2012	
19	PP	600°C-20min 400°C-30min	・加熱温度600°Cでは、 いずれのケースにおいても爆裂が発生。 ・Jute繊維が最も爆裂の抑制効果が高かった。 ・PVA繊維については、長さ4mmよりも 12mmの方が爆裂抑制効果高い。	96	2013	
	Jute					
	PVA					
20	Jute	RABT30	・繊維の混入率が多いほど爆裂抑制効果が高い。 ・Jute繊維の方がPP繊維より爆裂抑制効果が高い。	96	2013	
	PP					
21	Jute	ISO834-30min	・繊維の混入率が多いほど爆裂抑制効果が高い。 ・Jute繊維の方がPP繊維より爆裂抑制効果が高い。	81	2014	
	PP					
22	PP	RABT30	・PP繊維混入による顕著な爆裂抑制効果認められない。	59	2014	
23	Jute	ISO834	・繊維の混入率が多いほど爆裂抑制効果が高い。 ・Jute繊維の方がPP繊維より爆裂抑制効果が高い。	97	2015	細骨材に廃瓦を使用
	PP					
24	PP	ISO834-240min	・繊維の混入により軽微な爆裂に抑制	82	2016	粗骨材に石灰岩を使用
25	PP	ISO834-50min	・圧縮強度100・150N/mm ² の試験体については、 繊維を0.15vol.%の混入により爆裂を抑制 ・圧縮強度200N/mm ² の試験体については、 繊維を0.25vol.%の混入により爆裂を抑制 ・PP繊維とNY繊維の違いは明確でない。	83	2016	
	NY					
26	PP	RABT30	・繊維を0.20vol.%混入することで爆裂を抑制	64	2016	
27	BA	600°C-45min	・BA繊維は、爆裂における破壊因子となる。 ・PP繊維は、爆裂の抑制効果がある。	100	2017	
	PP	800°C-45min				
28	PP	RABT30	・繊維を0.20vol.%混入することで爆裂を抑制	65	2017	
29	Jute	RABT30	・Jute繊維の方がPP繊維より爆裂抑制効果が高い。 ・繊維を0.10vol.%混入することで爆裂を抑制	98	2018	
	PP					

※繊維の種類：PVA(ピニロン繊維)、PP(PP繊維)、NY(ナイロン繊維)、Jute(ジュート繊維)、PE(ポリエチレン繊維)、BA(バサル繊維)

2.4 繊維補強コンクリートの配合設計

2.4.1 普通コンクリートおよび高流動コンクリート

普通コンクリートの配合設計の方法は、一般に以下の手順で行われる。配合設計のフローを図2-4に示す。最初に設定する配合条件として、主に水セメント比と目標スランプが挙げられる。水セメント比は、設計基準強度および耐久性の確保の観点から必要な値を設定し、目標スランプは、各種施工条件よりワーカビリティを考慮して設定する。配合条件が決まると、単位水量、単位セメント量を設定した後、細骨材率もしくは単位粗骨材かさ容積を設定する。

単位水量、細骨材率もしくは単位粗骨材かさ容積の設定については、以下の各基準類に標準的な値が示されている。土木学会のコンクリート標準示方書には、水セメント比 55%、スランプ 8cm の配合条件を基本とした単位水量および細骨材率の概略値が設定されており、使用材料やコンクリートの品質の違いに応じてこの値を補正する方法が示されている¹⁹⁾。また、日本建築学会の建築工事標準仕様書 JASS5 には、スランプに応じた単位水量および単位粗骨材かさ容積の標準値が示されている⁵⁾。

高流動コンクリートについては、土木学会から高流動コンクリートの配合設計・施工指針が発刊されており、配合設計方法が示されている。普通コンクリートと概ね同じ手順で行うが、施工条件に応じて自己充填性のランクを設定し、そのランクに応じた流動性、材料分離抵抗性および間隙通過性を確保するために、単位粉体量や単位粗骨材絶対容積の目安が設定されている¹⁰⁷⁾。日本建築学会からも同様に高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説が発刊されており、流動性や材料分離抵抗性を確保するために、単位結合材量、単位ペースト量および単位粗骨材かさ容積等を適切に設定するよう記述されている¹⁰⁸⁾。

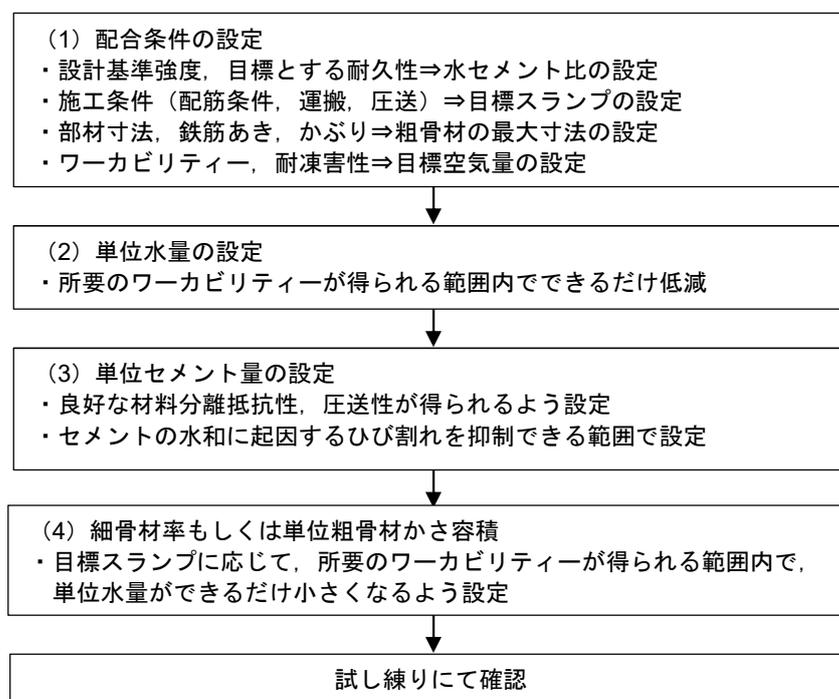


図 2-4 普通コンクリートの配合設計方法のフロー

2.4.2 繊維補強コンクリート

普通コンクリートや高流動コンクリートについては配合設計方法が確立されているが、短繊維を混入するコンクリートの配合設計方法においては知見が少ない。各基準類^{5), 19), 107), 108)}には、PP繊維を混入する場合のコンクリートの配合設計方法に関して、ほとんど記述がない。しかし、短繊維を混入したコンクリートのフレッシュ性状に関する研究は昔から行われており、短繊維を混入すると流動性が低下するため、良好なワーカビリティのコンクリートを得るには、単位水量や細骨材率を増加する必要があることが報告されている。小林ら¹⁰⁹⁾は、鋼繊維の混入がコンクリートの流動性に及ぼす影響や鋼繊維を混入する際の単位水量および細骨材率の補正方法に関する研究を行っている。その知見をまとめて、土木学会より発刊された鋼繊維補強コンクリートの設計施工指針（案）（以下、SFRC 指針と呼称）の中に配合設計方法として示されている¹¹⁰⁾。このSFRC 指針では、鋼繊維を1.5vol.%混入する場合の標準的な単位水量および細骨材率の目安を示すとともに、所要のワーカビリティを得るために、鋼繊維の混入率、スランプおよび鋼繊維のアスペクト比などの増加に伴い、単位水量や細骨材率を所定の割合で修正するよう示されている。その配合の修正方法を表 2-7 に示す。

表 2-7 鋼繊維を混入する場合の配合の修正方法¹¹⁰⁾

粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	AEコンクリート (空気量5%)		AE剤を用いないコンクリート		
	細骨材率 s/a(%)	単位水量 W(kg/m ³)	エントラップ エア(%)	細骨材率 s/a(%)	単位水量 W(kg/m ³)
10	68	214	3.0	70	225
15	65	208	2.8	68	221
20	60	200	2.5	63	215
25	55	191	2.1	58	208
上記の条件が異なる場合に対する補正					
条件の変化		細骨材率(%)		単位水量 (kg/m ³)	
鋼繊維混入率0.5%の増減に対して		Gmax: 10, 15mm Gmax: 20mm Gmax: 25mm	± 10 ± 8 ± 5	± 10	
水セメント比0.05の増減に対して		± 1		± 2.5	
細骨材のFM0.1の増減に対して		± 0.5		補正しない	
スランプ1cmの増減に対して		補正しない		± 3	
空気量1%の増減に対して		± 1		± 6	
鋼繊維のアスペクト比10の増減に対して ^{注1)}		± 3		± 10	

注1) この表は鋼繊維の断面寸法が0.3~0.6mmの範囲の場合のみ適用される。

小林らの研究以降、短繊維を混入したコンクリートに関する研究が進められており、さまざまな繊維の形状、混入率、流動性、使用骨材および配合におけるフレッシュコンクリートの品質に関する知見が報告されている。SFRC 指針との整合性や配合の修正方法までは言及していないものの、短繊維の混入により流動性が低下するため、所要の流動性を確保するには単位水量の増加が必要であることが報告されている^{111)~115)}。また、繊維の混入による単位水量や細骨材率の増加に対して定量的な補正量について報告されている^{116)~125)}。これらの文献をもとに、SFRC 指針と各文献との単位水量や細骨材率に関するデータをまとめた比較を表 2-8 に示す。

表 2-8 既往の文献と SFRC 指針により推定した配合の比

No.	繊維の種類	繊維の形状		繊維のアスペクト比	検討した繊維の混入率 (vol.%)	細骨材の粗粒率	粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	水セメント比 (%)	ベースコンクリート		繊維混入後のコンクリート		SFRC指針により補正した配合※		繊維混入率を0.5vol%増加する場合の補正量		文献番号	文献年度	備考	
		直径 (mm)	長さ (mm)									単位水量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)				単位水量 (kg/m ³)						
1	鋼繊維	0.61	29	48	1.5	3.28	15	5.0	8.0	-	50.0	177	66.0	218	66.0	196	62.8	13.7	0.0	115	1981		
		0.50	30	60	1.5	-	20	5.0	15.0	-	55.0	172	40.0	217	55.0	224	61.0	15.0	5.0	117	1981	粗骨材最大寸法20mm, W/C=55%, スランブ15cmの例	
2	鋼繊維	0.50	30	60	2.0	2.71	15	2.9	8.0	-	40.0	189	55.0	215	69.0	241	77.7	13.0	7.0	116	1982	超速硬セメント, 高性能減水剤 ベースコンクリート: SF1.0vol.% 空気量は図より3%と仮定	
		0.61	29	48	1.5	3.28	15	5.0	8.0	-	50.0	177	66.0	218	66.0	196	62.8	13.7	0.0	115	1981		
3	鋼繊維	0.50	30	60	1.5	-	20	5.0	15.0	-	55.0	172	40.0	217	55.0	224	61.0	15.0	5.0	117	1981	粗骨材最大寸法20mm, W/C=55%, スランブ15cmの例	
		0.80	60	75	0.5	2.58	25	4.5	18.0	-	55.0	190	42.0	205	55.0	214	48.9	15.0	8.0	118	1995		
5	鋼繊維	0.80	60	75	1.3	2.37	20	3.0	5.0	-	39.0	154	53.7	178	62.0	233	67.5	15.5	5.5	119	1999	ベースコンクリート: SF40kg/m ³ , 超速硬セメント, 高性能減水剤	
		0.60	30	50					8.0	-	55.0	175	46.0	195	53.7	186	48.2	10.0	3.9				
6	ポリプロピレン繊維	1.00	30	30	1.0	2.53	20	4.5	8.0	-	55.0	175	46.0	183	49.1	166	42.2	4.0	1.6	120	2000		
		1.00	30	30					12.0	-	45.0	160	44.0	168	47.2	173	40.2	4.0	1.6				
		1.00	30	30					24.0	60.0	35.0	175	44.7	175	44.7	204	38.2	0.0	0.0				スランブ24cmと仮定
7	鋼繊維	0.60	30	50	1.5	2.62	15	2.0	12.0	-	55.6	200	60.0	215	67.5	231	57.2	5.0	2.5	121	2001	SFRC吹付け 高性能減水剤無し, 高性能減水剤	
		0.16	6	38					21.0	-	44.4	200	58.0	230	69.0	252	54.98	10.0	3.7				SFRC吹付け 高性能減水剤有り, 高性能減水剤
8	ビニロン繊維	0.20	24	120	1.5				18.0	-						305	81.3	0.0	8.0				
		0.40	30	75	2.5	2.66	15	3.0	18.0	-	40.0	175	55.7	175	71.7	280	87.8	0.0	4.0	122	2003		
		0.60	30	50	3.0				18.0	-						265	90.3	0.0	2.7				
9	鋼繊維	0.60	30	50	1.0	2.83	15	4.5	25.0	65.0	35.0	175	50.0	193	59.7	235	48.7	9.0	4.9	123	2003	スランブ25cmと仮定	
		0.62	30	48	2.0	2.73	20	4.5	8.0	-	50.0	180	45.0	180	57.0	201	63.6	0.0	3.0	124	2004		
10	鋼繊維	0.16	6	38					8.0	-	50.0	192	45.0	192	47.5	191	71.7	0.0	0.6				
		0.16	6	38					8.0	-	50.0	192	45.0	192	47.5	191	71.7	0.0	0.6				

※ SFRC指針に記載されている目安となる配合から、鋼繊維の混入率、水セメント比、細骨材の粗粒率、スランブ、空気量および繊維のアスペクト比の条件の違いによる補正を加えた値。これらの条件に記載のない文献については、その該当する条件の補正は行わないものとした。

既往の知見を整理した表 2-8 に示すデータをもとに、単位水量および細骨材率について SFRC 指針より推定した値と既往の文献の値を比較したグラフを図 2-5 および図 2-6 に示す。

単位水量および細骨材率ともに既往の文献の値に比べて SFRC 指針により推定した値の方が大きい値を示しているデータが複数認められる。

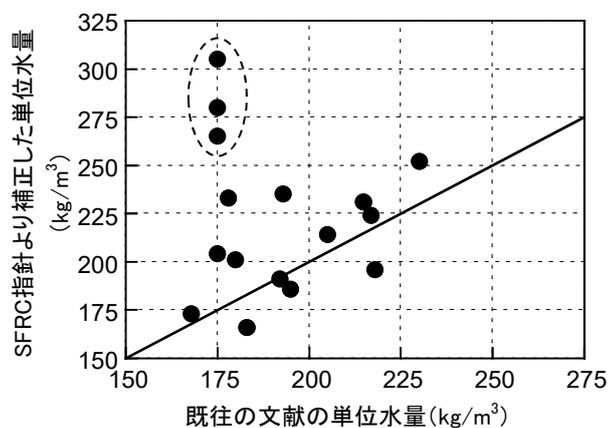


図 2-5 既往の文献の値と SFRC 指針による補正值との単位水量の比較

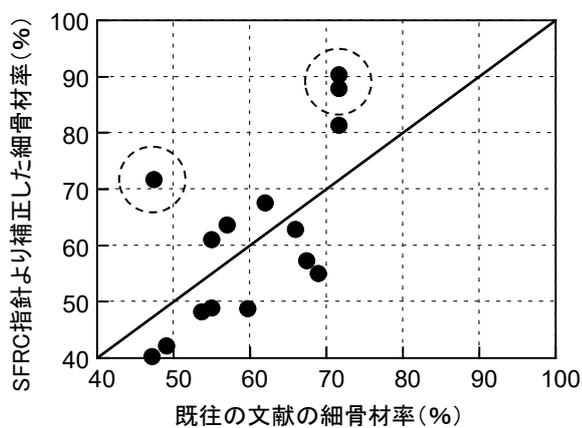


図 2-6 既往の文献の値と SFRC 指針による補正值との細骨材率の比較

また、既往の知見を整理した表 2-8 に示すデータについて、スランブおよび繊維のアスペクト比に着目して、単位水量および細骨材率について、SFRC 指針による補正値を既往の文献の値に対する割合で整理した結果を図 2-7 および図 2-8 に示す。

細骨材率については、スランブおよび繊維のアスペクト比が増加しても、ほぼ 1.0 近傍に推移しており、SFRC 指針による推定値は、既往の文献の値と概ね一致する結果である。単位水量については、スランブに着目すると、SFRC 指針による補正値が既往の文献の値に比べて大きいデータがいくつか存在する。また、繊維のアスペクト比に着目すると、アスペクト比の増加に伴い、SFRC 指針による補正値の既往の文献の値に対する割合が増加しており、SFRC 指針による推定値が実際の単位水量よりも大きくなる傾向を示している。このように、SFRC 指針に示されている配合の修正方法に基づき単位水量を設定しても、使用する繊維の形状、混入率およびスランブによっては、実際の配合と差異が生じる場合がある。

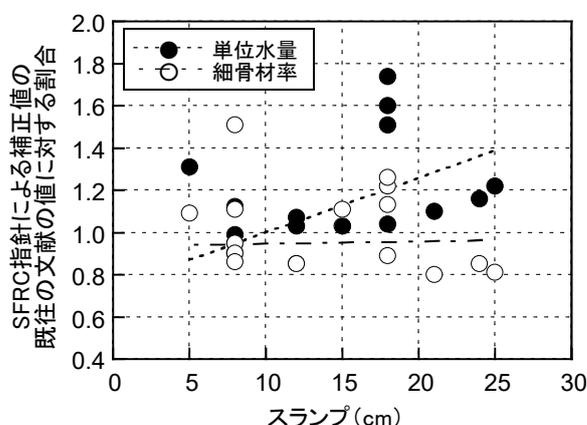


図 2-7 スランブと SFRC 指針による補正値の既往の文献の値に対する割合

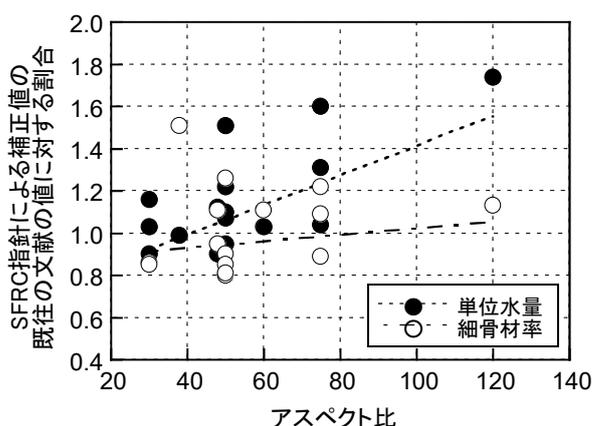


図 2-8 アスペクト比と SFRC 指針による補正値の既往の文献の値に対する割合

2.5 火害を受けたコンクリートの補修技術

2.5.1 劣化部の調査方法

コンクリート構造物が火害を受けた場合、表層のコンクリートは、強度や耐久性が低下するため、劣化部を除去して補修を行う必要がある。補修が必要な深さを把握するためには、火害によるコンクリートの劣化範囲とその程度を事前に推定する必要がある。

火害を受けたコンクリートの劣化の程度を測定する方法として多数の方法が提案されている^{126)~128)}。その中で主な方法として次の4つの方法が挙げられる。

- a) 変色状況から受熱温度を推定する方法
- b) 化学的に水酸化カルシウムの変質した領域を判定する方法
- c) 物理的にコンクリートの強度や硬さを測定する方法
- d) ひび割れの発生状況から劣化深さを測定する方法

具体的な研究事例として、方法 a) として、一般に加熱されたコンクリート表面や採取したコアの表面を目視観察し、その変色の度合いを調査することにより受熱温度を推定する方法が報告されている^{129)~131)}。また、春畑ら¹³²⁾は、分光測色計を用いた色彩測定により、定量的に変色度合いを把握し、受熱温度を測定する方法について報告している。方法 b) として、採取したコアなどによる中性化深さの測定や、示差熱質量分析や X 線回折などの化学分析が挙げられる^{128), 133)~135)}。方法 c) として、コアを採取し、圧縮強度やビッカース硬さを測定したり、リバウンドハンマーにより表面の反発度を測定する方法が挙げられる^{128), 135)~141)}。また、春畑ら¹³⁹⁾は、引っかけ傷を加えた後、その傷の幅から強度を推定する方法を提案している。方法 d) として、超音波伝播速度や衝撃弾性波などの測定により、内部の劣化状況を診断する方法が提案されている^{134), 136), 142)~150)}。さらに、春畑ら^{132), 141)}は、非破壊検査方法として、加熱面をハンマで打撃した際の機械インピーダンスやハンマの接触時間の測定により劣化状態を推定する方法や、表層透気試験により透気係数から受熱温度を推定する方法について報告している。

これらの火害の調査方法の中で、簡易に調査できるため、目視観察、中性化深さおよびリバウンドハンマーによる反発度の測定が行われることが多い。しかし、目視調査は、おおよその劣化範囲は推定できるものの定量的な劣化深さの判定は難しい。中性化深さの測定は、受熱温度が 500°C 以上の範囲は特定できるものの、劣化の分布の把握は難しい。リバウンドハンマーによる反発度の測定は、測定する位置の劣化の程度は測定できるが、深さ方向の劣化の分布の推定は困難である。また、方法 d) として、非破壊試験方法がいくつか提案されているが、まだ研究段階であることと、トンネル火災を想定した RABT 曲線による劣化状態を検証した事例は少ない。さらに、特殊な解析技術や専門知識が必要な技術は汎用的でない。

深さ方向の受熱温度や強度分布を簡易に測定する方法が提案されている。皿井ら¹⁵¹⁾、清宮ら¹²⁸⁾および澤口ら¹⁵²⁾は、小径の直径 42mm で削孔した孔内に $\phi 6\text{mm}$ の載荷先端部分を備えた載荷装置を挿入し、その載荷先端を押し出すように荷重を作用させて孔内のコンクリート側面に貫入させ、その貫入抵抗値から劣化深さを推定する孔内局部載荷試験を提案している。Felicetti ら¹⁵³⁾は、ハンマドリルで穴をあける際に必要な単位深さ当たりの仕事量から穿孔抵抗を測定し、劣化深さを推定する方法を提案しており、健全部に対する相対評価は可能となっている。簡易な評価手法については知見が少なく、短期間のうちに効率よく劣化範囲を推定できる技術が望まれている。

2.5.2 ポリマーセメントモルタルによる補修技術

劣化したコンクリートの補修には、接着性が良く、緻密で耐久性や化学抵抗性が高いなどの観点から、一般にポリマーセメントモルタル（以下、PCM と呼称）が使用される¹⁵⁴⁾。しかし、PCM は、熱伝導率が低く遮熱性が高いが、緻密であり耐爆裂性が低いとの報告もある。PCM の研究は、大濱らが1980年にポリマーの種類によって燃焼特性が異なることを確認している¹⁵⁵⁾。また、1982年に150℃まで加熱した場合に、圧縮強さや曲げ強さが低下し、ポリマーセメント比が大きくなるほどその傾向が増大することを報告している¹⁵⁶⁾。その後、エチレン・酢酸ビニル（EVA）、酢酸ビニル・ベオバ・アクリル（VVA）、ポリアクリル酸エステル（PAE）およびスチレン・ブタジエンラバー（SBR）の4種類の樹脂について、建築分野を中心に研究が進められている。濱崎、野口および王ら^{157), 158)}は、1000℃までの加熱実験を行い、加熱温度の上昇に伴い、圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度および付着強度などが低下するとしている。さらに、壁状試験体に、一辺100, 300および500mmで深さが10~60mmの範囲をPCMで補修した試験体を用いてISO曲線による加熱実験を行っており、補修面積が大きく、補修厚さが薄い場合は剥落やはらみを生じる可能性が高くなることを報告している¹⁵⁹⁾。

安藤ら¹⁶⁰⁾は、ポリマーセメント比の増加に伴い熱伝導率が増加し、熱が伝わりやすいことが爆裂の一因となると指摘している。濱崎ら¹⁶¹⁾および金ら¹⁶²⁾はPCMの発熱性試験を実施しており、発熱量や発熱速度は水セメント比には依存せず、ポリマー量に依存すると報告しており、発熱量はVVA, EVA, SBRの順に増大して、燃焼しやすくなると報告している。大濱ら¹⁶³⁾は、発熱性試験や不燃性試験を実施し、ポリマーセメント比が10%以下であれば、ポリマーの種類に関わらず不燃性が高いとしている。

耐爆裂性に関しては、岡村ら¹⁶⁴⁾は、ポリマーの添加により耐爆裂性が低下することを指摘している。山田ら¹⁶⁵⁾は、補修厚さ10mmと30mmの2種類で実験を行っており、補修厚さの厚い30mmの方が熱分解によるガスが多くなるため、爆裂抵抗性に劣るとしている。また、PCMの種類によっても耐爆裂性が変わると報告している¹⁶⁶⁾。また、ポリマーセメント比が4%以下であれば爆裂が生じにくいとの報告もある¹⁶⁷⁾。杉野ら¹⁶⁸⁾は、リング拘束試験体⁵⁷⁾を用いて普通モルタルとPCMの比較を行っており、PCMの方が爆裂の程度が大きいと報告している。

コンクリートと同様に、PCMについてもPP繊維の混入による爆裂の抑制対策に関する研究も報告されている。森田ら^{169), 170)}は、PP繊維の混入率やポリマーセメント比を実験水準として検討を行い、ポリマーセメント比が0.75%以下であれば、PP繊維を0.2vol.%混入することで爆裂を抑制できることや、PP繊維の混入率の増加に伴い爆裂深さを低減できることを報告している。杉野ら¹⁷¹⁾は、ナイロン繊維が0.1vol.%混入されたPCMを用いたリング拘束試験体⁵⁷⁾にて耐火実験を行っており、爆裂が抑制されたと報告している。また、住ら¹⁷²⁾および唐沢ら^{173), 174)}は、PCMで補修した場合、浮きや剥落を生じるため、ステンレスメッシュをアンカーで止める工法を提案している。

爆裂の簡易な評価方法として、梶田ら¹⁷⁵⁾および鈴木ら^{176), 177), 178)}らは、示差熱質量分析から求めた発熱ピーク面積や直径50mmの供試体を800℃の電気炉で20分加熱する簡易爆裂評価試験の結果から、耐爆裂性の評価を行っており、森田ら¹⁷⁰⁾は、縦100×横100×長さ400mmの角柱供試体を用いて、ISO曲線にて45分加熱による簡易評価方法を提案している。

このように、これまで建築分野を中心に火害を受けたコンクリート構造物の補修技術に関する研究が進められてきたため、ISO 曲線での加熱や 1000℃以下の検討事例が多いが、土木分野における検討事例は少ない。トンネル火災を想定した RABT 曲線での検討事例として、田嶋ら¹⁷⁹⁾および森田ら¹⁸⁰⁾は、セグメントを模擬した高強度コンクリートの平板の表面をウォータージェットで劣化部を除去した後、吹付けによる補修を行い、RABT 曲線による加熱実験を行っている。PP 繊維を 0.20～0.26vol.%混入することで爆裂を抑制できると報告している。林ら^{181), 182)}は、耐火実験により加熱した試験体の表面から 6cm 部分を研りとり、吹付けや左官にて補修を行った試験体を用いて再度加熱を行い、補修材の耐爆裂性や遮熱性について検討しており、その結果、ポリアセタール繊維を 0.20vol.%混入することで爆裂を抑制できたとしている。

2.6 まとめ

本章では、コンクリート建造物の耐火技術に関して、これまでの規準および指針類、シールドトンネルの火害対策、有機繊維による耐爆裂性の確保技術、繊維補強コンクリートの配合設計および火害を受けたコンクリートの補修技術について、技術の変遷や既往の研究成果の整理を行った。そして、耐火工の具体的な構築方法の提案に必要な課題を抽出するとともに、本研究の位置づけを明確にした。

得られた知見を以下に示す。

- (1) 土木分野においては、シールドトンネルの車両火災に対する安全性に関するさまざまな研究が進められている。2000年代に入ってシールドトンネルは、耐火工として覆工コンクリートの表面に耐火被覆を施すことにより安全性を確保してきたが、近年では覆工コンクリート自体に耐火性を付与する技術に変わってきた。
- (2) コンクリート建造物における耐火技術に関して、学協会や発注機関にて、その研究成果を取りまとめた規準や指針類の整備が進められているが、耐火コンクリートの具体的な使用材料、配合については示されていない。
- (3) シールドトンネルの車両火災に対する耐火性の照査を行うために、実規模の耐火実験による検証が行われている。国内では、加熱曲線にトンネル火災を想定した最大温度 1200℃を 60 分まで保持する RABT 曲線が使用されることが多い。
- (4) 爆裂のメカニズムに関する研究が進められ、爆裂は水蒸気圧説と熱応力説の複合作用によって発生することが次第に明らかとなりつつある。国内のシールドトンネルにおける耐爆裂性を確保する対策として、有機繊維の混入が主流となっているが、RABT 曲線による加熱を受ける場合の繊維の形状や混入率に対して、体系的な見解は得られていない。
- (5) 爆裂の抑制に用いられる有機繊維には、直径が小さく、アスペクト比の大きい繊維が用いられる。従来の曲げ靱性の改善や剥落防止対策に用いられる、太くて長い繊維を用いる場合の配合設計手法に関する研究は多くなされており、定量的な方法も指針に規定されているが、爆裂の抑制対策に用いるような細長い繊維を用いる場合の配合設計手法は確立されていない。
- (6) 火害を受けたコンクリート部材の劣化の程度を測定する方法として、さまざまな方法が提案されているが、大まかな劣化範囲は推定できるが劣化深さの推定が困難であったり、特殊な解析技術や専門知識が必要であるなど、それぞれに課題がある。手間がかからず、短期間のうちに効率よく簡易に劣化範囲を推定できる技術が求められている。
- (7) コンクリート建造物の劣化部の補修方法として、ポリマーセメントモルタルが使用されることが多いが、汎用の材料は爆裂に対する抵抗性に劣ることが指摘されている。都市部の地下に構築されるシールドトンネルの補修においては、高強度でかつ RABT 曲線による加熱履歴に対する耐爆裂性を確保することが求められるが、研究事例は少なく、具体的な使用材料や配合に関する知見は少ない。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 1997, 1997
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2003, 2003
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009, 2009
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015, 2015
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2018, 2018
- 6) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック, 2004
- 7) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック, 2009
- 8) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック, 2017
- 9) 日本建築学会：建物の火害診断及び補修・補強方法, 2004
- 10) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法 指針(案)・同解説, 2010
- 11) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法 指針・同解説, 2015
- 12) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書, 2002
- 13) 日本コンクリート工学会：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書, 2012
- 14) 日本コンクリート工学会：高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書, 2017
- 15) 土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ, No.63, 2006
- 16) 土木学会：トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針(案), コンクリートライブラリー, No.143, 2014
- 17) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2008
- 18) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2013
- 19) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2017
- 20) 総務省消防庁：平成30年度版 消防白書, 2019
- 21) 河村忠孝：日本坂トンネル内の車両火災事故とその復旧, セメントコンクリート, No.439, pp.108-111, 1983
- 22) 日経BP社：英仏海峡トンネル火災で深刻な構造被害, 日経コンストラクション, pp.20-21, 2008.12
- 23) 清宮理：耐火技術とコンクリートー土木ー, コンクリート工学 特集*耐火技術とコンクリート, Vol.45, No.9, pp.8-13, 2007
- 24) 田嶋仁志：シールドRCセグメント構造の耐火技術と設計, コンクリート工学 特集*耐火技術とコンクリート, Vol.45, No.9, pp.61-66, 2007
- 25) 首都高速道路株式会社：トンネル構造物設計要領(シールド工法編), 第3編 耐火設計, pp.1-27, 2008
- 26) 土橋浩：土木構造物の耐火技術 ～設計・施工事例～, (独)日本学術振興会 建設材料第76委員会, 第424回会議, 2015
- 27) ISO 834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements,

1999

- 28) Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures Part 2.2: Actions on Structures Exposed to Fire, Draft for Development, DD ENV 1991-2-2, 1996
- 29) ZTV-TUNNEL, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Strabentunneln, Teil 1, Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise), 1995
- 30) Report concerning on an investigation into the behavior of a concrete slab protected by a coating of PROMATECH-H Plates of 25mm in thickness upon heating according to a curve prescribed by the RIJKSWATERSTAAT in the Netherlands, TNO Report B-85-191 (E), 1985
- 31) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策，特集 耐火技術とコンクリート，コンクリート工学，Vol.87，No.9，pp.87-91，2007.9
- 32) Harmathy, T.Z.: Effect of moisture on the fire endurance of building elements, ASTM special Technical Publication No.385, ASTM, Philadelphia, pp.74-95, 1965
- 33) Hertz, K. D. :Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, Vol.38, pp.103-116, 2003
- 34) 王若平，川上寛正，小澤満津雄，森本博昭：コンクリートの爆裂現象に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1703-1708，2006
- 35) 小澤満津雄，王若平，坂昇，森本博昭：高温加熱によるコンクリートの爆裂現象に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.753-758，2007
- 36) 木村和弘，小澤満津雄，六郷恵哲，森本博昭：繊維補強コンクリートの爆裂性状と内部蒸気圧との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.339-344，2008
- 37) 長尾覚博，中根淳：高温を受けるコンクリート部材の水分移動と圧力形成に関する模型実験，日本建築学会構造系論文報告集，Vol.452，pp.1-10，1993
- 38) 一瀬賢一，丹羽博則，長尾覚博：火災時の鉄筋コンクリート柱内部の熱・水分移動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.67，No.553，pp.7-12，2002
- 39) 高正遠，柳東佑，兼松学，野口貴文：火災加熱環境下におけるコンクリート中の熱・水分移動および爆裂に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.71，No.607，pp.23-30，2006
- 40) 米澤敏男，三好徹志，松下哲郎，川尻聡：火災加熱を受ける高強度コンクリート中の水による圧力と損傷機構，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1151-1156，2010
- 41) 榎村剛，兼松学，土屋直子，飯倉寛：高温加熱を受けるコンクリート中の水分挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1181-1186，2011
- 42) 榎村剛，兼松学：高強度コンクリートの爆裂時の水分挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1108-1113，2012
- 43) 兼松学，中野昌宏，田村政道：高温加熱を受けるセメント硬化体の脱水を考慮した水分挙動の爆裂への影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1468-1473，2014
- 44) 小山拓，西尾悠平，伊藤大介，兼松学：中性子イメージングを用いた高強度コンクリート内部の脱水に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1013-1018，2019
- 45) 齋藤光：プレストレストコンクリート部材の爆裂について，日本火災学会論文集，Vol.15，No.2，pp.23-30，1966

- 46) 古村福次郎：火災時における鉄筋コンクリート構造の局部熱応力に関する研究，日本建築学会論文報告集，Vol.182，pp.11-20，1971
- 47) 宋勲，菅原進一，田村政道，望月秀敏：高温時におけるコンクリートの内部応力解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.895-900，2001
- 48) 宋勲，菅原進一，田村正道：軽量コンクリートの耐火性能に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.561-566，2002
- 49) 長尾覚博，中根淳：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集，Vol.18，No.1，pp.657-662，1996
- 50) 長尾覚博，中根淳：高強度コンクリートの爆裂制御に関する検討結果，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.6631-636，1997
- 51) Consolazio, G. R., McVay, M. C. and Rish III, J. W. :Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement Mortar subjected to radiant heating, ACI Materials Journal, Vol.95, No.5, pp.525-536, 1998
- 52) Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R. and Mang, H. A. :How to polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.5, pp.929-942, 2006
- 53) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，六郷恵哲：拘束リング試験法を適用したコンクリートの高温環境下における耐爆裂性評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1138-1143，2012.6
- 54) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，六郷恵哲：拘束リング試験法を適用した爆裂評価手法のリング標準化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1135-1140，2013.6
- 55) 佐藤諒一，小澤満津雄，谷辺徹，六郷恵哲：高強度コンクリートの粗骨材岩種の違いが拘束リング爆裂評価手法の結果に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1141-1146，2013.6
- 56) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，内田裕市：拘束リング試験法を適用した超高強度繊維補強コンクリートの爆裂深さの推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1336-1341，2014
- 57) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，内田裕市，六郷恵哲：高温環境下での高強度コンクリートの耐爆裂性評価における爆裂発生指標の提案，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.70，No.1，pp.104-117，2014
- 58) 石塚遼，小澤満津雄，谷辺徹，鎌田亮太：拘束リング試験法によるコンクリートの爆裂性状の解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1342-1347，2014
- 59) 鉄羅健太，小澤満津雄，竹渕貴博，谷辺徹：リング拘束試験方法によるコンクリートの爆裂評価と引張ひずみ破壊モデルの解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1015-1020，2015
- 60) 明石孝太，小澤満津雄，藤本謙太郎，鎌田亮太：引張ひずみ破壊モデルを適用した火災時のコンクリートの爆裂解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1299-1304，2016
- 61) 鎌田亮太，小澤満津雄，明石孝太，谷辺徹：リング拘束試験法における高強度コンクリート

- の爆裂性状に及ぼす養生期間の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1305-1310, 2016
- 62) 山本哲, 小澤満津雄, 谷辺徹, 古市耕輔: 実大 RC セグメントの耐火試験と同配合で作製したリング拘束供試体加熱試験結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1123-1128, 2017
- 63) 村上真聖, 小澤満津雄, 明石孝太, 杉野雄亮: 熱応力と水蒸気圧を考慮した高強度コンクリートの爆裂解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1047-1052, 2018
- 64) 池谷拓由紀, 藤本謙太郎, 小澤満津雄: PC はりとリング拘束供試体の加熱試験による爆裂性状の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.989-994, 2019
- 65) 日本コンクリート工学会: コンクリートの爆裂試験方法, JCI-S-014-2018, 2018
- 66) Sarvaranta, L., Elomaa, M. and Jarvela, E. :A Study of Spalling Behavior of PAN Fibre-reinforced Concrete by Thermal Analysis, Fire and Materials, Vol.17, pp.225-230, 1993
- 67) 山崎庸行, 西田朗: 耐爆裂性コンクリート, コンクリート工学, Vol.36, No.1, pp.44-47, 1998
- 68) 百瀬晴基, 桜本文敏, 柳田克巳: ポリプロピレン繊維を混入した設計基準強度 150N/mm² の超高強度コンクリートの耐火性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.995-1000, 2003
- 69) 菊田繁美, 平島岳夫, 吉田正友, 上杉英樹: 超高強度鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.187-192, 2003
- 70) 高野智宏, 三宅武史, 堀口敬, 佐伯昇: ハイブリッド繊維で補強した高強度コンクリートの耐火性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1123-1128, 2005
- 71) 竹内博幸, 森達哉, 河野政典, 起橋孝徳: 被覆材料による高強度コンクリートの爆裂防止対策の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1187-1192, 2006
- 72) 韓千求, 韓ミンチョル, 李建哲, 許榮善: 有機繊維を調合使用した高強度コンクリートの爆裂防止, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.151-156, 2007
- 73) 韓千求, 韓敏喆, 李建哲, 李周宜: 複合有機繊維の混入率が高強度コンクリートの耐火特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1501-1506, 2009
- 74) 李泰圭, 金圭庸, 李昇勳, 金武漢: 繊維の熔融及び気化を考慮した超高強度コンクリートの爆裂特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1114-1119, 2012
- 75) 三好徹志, 米澤敏男: 火災加熱を受ける高強度 RC 柱の損傷プロセスに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1162-1167, 2012
- 76) 竹内博幸, 高橋祐一, 山本基由: 簡易耐火試験による超高強度コンクリート爆裂対策の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1276-1281, 2012
- 77) Davaajav Munkhtsatsral, 小澤満津雄, 周波, 内田裕市: 天然繊維を適用した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1330-1335, 2014
- 78) 森田武, 西田朗, 片山行雄, 菅野光寿: 石灰岩碎石を粗骨材として用いた高強度鉄筋コンクリート造柱の耐火性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1281-1286, 2016
- 79) 崔景喆, 金圭庸, Nenad Gucunski, 金武漢: 200MPa 級超高強度コンクリートを用いた RC 柱

- の耐火性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1287-1292, 2016
- 80) Kalifa, P., Menneteau FD., Quenrd D. :Spalling and pore pressure in HPC at high temperature, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.1915-1927, 2000
- 81) Kalifa, P., Gregoire Chene, Christophe Galle :High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure, Cement and Concrete Reseach 31, pp.1487-1499, 2001
- 82) Kalifa, P. Chene, G. Galle, C :High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure, Cement and Concrete Research, pp.1487-1499, 31, 2001
- 83) Long T. Phan :High performance concrete at high temperature-an overview, NIST report, 2002
- 84) T. Atkinson, :Polypropylene fibres control explosive spalling in high-performance concrete, CONCRETE, Vol.38, No.10, pp.69-70, 2004
- 85) Matthias Zeiml and David Leithner and Roman Lacker and Herbert :How to polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete, Cement and Concrete Research, Vol.36, pp.929-942, 2006
- 86) Suhaendi, S. L. and Horiguchi, T. :Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fiber reinforced high strength concrete after heat exposition, Cement and Concrete Research, pp.1672-1678, 36, 2007
- 87) Khoury, G. A., Willough. B. :Polypropylene fibers in heated concrete, Part 1 :Molecular structure and materials behavior, Magazine of Concrete Research, pp.125-136, 60, (2), 2008
- 88) Khourry, G. A., :Polypropylene fibers in heated concrete Part 2 :Pressure relief mechanisms and modelling criteria, Magazine of Concrete Research, pp.189-204, 60, (3), 2008
- 89) 小澤満津雄, 水野宏紀, 森本博昭 :高温環境下における水溶性 PVA 繊維および Jute 繊維混入コンクリートの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1133-1138, 2010
- 90) 小澤満津雄, 俵想太郎, 内田裕市, 森本博昭 :高温環境下における各種短繊維を添加した超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1120-1125, 2012
- 91) 川口潤, 小澤満津雄, 周波, 内田裕市 :超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制と加熱後の残存強度に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1153-1158, 2013
- 92) 小澤満津雄, 森本博昭 :高温環境下における天然繊維を添加した高強度コンクリートの爆裂抑制効果, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.3, pp.324-336, 2013
- 93) 明石孝太, 小澤満津雄, 周波, 内田裕市 :内部養生を施した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.985-990, 2015
- 94) 赤坂春風, 小澤満津雄, Sirjana Subedi Parajuli, 杉野雄亮 :リング拘束供試体加熱試験による天然繊維を混入した高強度コンクリートの爆裂抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1029-1034, 2018
- 95) 浦野知子, 林成卓, 土橋浩, 角田浩 :鋼繊維補強コンクリートの耐火性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.321-326, 2004
- 96) 高橋広大, Sanjay PAREEK, 小澤満津雄 :バサルト繊維を用いた超高強度コンクリートの基

- 礎性状及び高温時における爆裂抵抗性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1117-1122, 2017
- 97) 堀誠行, 大関宗孝, 大塚孝義, 神田亨: RCセグメントの高温時の特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 98) 田嶋仁志, 岸田政彦, 神田亨: 火災高温時におけるRCセグメントの変形挙動に関する部分モデル実験, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.844-854, 2006
- 99) 新井崇裕, 平石剛紀, 宮本圭一, 横井伸昭: 剥落防止機能を有する有機系短繊維補強コンクリートの耐火性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.381-386, 2007
- 100) 森山守, 小原伸高, 六郷恵哲: 大断面 TBM における二次覆工機能を有した耐火 RC ライナーについて, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.453-458, 2007
- 101) 堀口賢一, 丸屋剛, 馬場重彰, 水野敬三: 鋼繊維コンクリートの耐火性に及ぼす配合の影響と加熱後の劣化評価手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1139-1144, 2010
- 102) 清宮理, 安本辰也: 車両火災によるコンクリート板の損傷に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1150-1155, 2012
- 103) 半野久光, 田嶋仁志, 川田成彦, 谷上敦亨: RCセグメントの耐火性能に関する実験的検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1719-1724, 2002
- 104) 田嶋仁志, 岸田政彦, 神田亨, 森田武: 火災高温時におけるシールドトンネル RC 覆工断面の変形挙動解析, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.606-618, 2006
- 105) 市原三馨, 水野敬三, 道越真太郎, 丸屋剛: セグメント接手部の火災時の挙動に関する実験的および解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.73-78, 2008
- 106) 河村圭壺, 福浦尚之, 服部佳文: 火災加熱を受けるコンクリート構造物の3次元熱伝導・熱応力解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1156-1161, 2012
- 107) 土木学会: 高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012年版], コンクリートライブラリー136, 2012.6
- 108) 日本建築学会: 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説, 1997.1
- 109) 小林一輔, 岡村雄樹: 所要のコンシステンシーを得るための鋼繊維補強コンクリートの配合設計方法, 土木学会論文報告集, Vol.296, pp.111-119, 1980
- 110) 土木学会: 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), コンクリートライブラリー第50号, 1983.3
- 111) 豊福俊英: アラミド繊維補強コンクリートの配合設計方法, セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.802-807, 1992
- 112) 嵯峨山剛, 宮本達哉, 眞嶋光保, 堀内盛夫: ビニロン繊維補強コンクリートのフレッシュ状態における性質, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.582-587, 1993
- 113) 栗田守朗, 塩屋俊幸, 林秀彦, 吉武讓二: 鋼繊維補強高強度モルタルの諸性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, 2000
- 114) 上田賢司, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 広原寿竜: 短繊維補強コンクリートの強度特性と乾燥収縮ひび割れ, コンクリート年次論文集, Vol.23, No.2, 2001

- 115) 栗田守朗, 田中博一: ECL 工法の一次覆工を対象とした高流動鋼繊維補強コンクリートのフレッシュ性状に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.767, V-64, pp.177-184, 2004
- 116) 田代恭一, 堀井勝, 大西三郎, 江上煌: 吹付け鋼繊維補強コンクリートの特性について, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.3, pp.245-248, 1981
- 117) 峰松敏和, 銀山功, 佐々木真, 橋本孔成: 超速硬セメントを用いた鋼繊維補強コンクリートの配合設計方法に関する検討, セメント技術年報, No.36, pp.393-396, 1982
- 118) 友沢史紀, 福士勲, 田中斉, 安田正雪: 鋼繊維補強コンクリートの標準調合に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.7, No.1, pp.229-232, 1985
- 119) 眞嶋光保, 小比賀啓司: 鋼繊維補強コンクリートの流動化を目的としたフレッシュ特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.427-432, 1995
- 120) 羽生賢一, 水越睦視, 内田美生, 上東泰: 長さ 60mm の鋼繊維を用いた鋼繊維補強コンクリートの諸性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.247-252, 1999
- 121) 平石剛紀, 坂田昇, 矢吹増男, 細田常正: ポリプロピレン短繊維補強コンクリートのフレッシュおよび硬化性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, 2000
- 122) 清水哲史, 伊藤正憲, 田中明斉, 魚本健人: 繊維補強吹付けコンクリートの配合設計手法に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001
- 123) 住学, 竹内博幸, 中出睦, 谷垣正治: ビニロン繊維補強コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
- 124) 上原匠, 堀田新之介, 牛田耕悟, 梅原秀哲: 高流動繊維補強コンクリートの配合設計に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.245-250, 2003
- 125) 堀口至, 佐伯昇, 市坪誠, 竹村和夫: 微小鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーについて, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 126) 小林幸一, 枝広英俊: 火害を受けたコンクリート構造物に対する非破壊・微破壊試験の適用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol73, No.629, pp.1027-1034, 2008.7
- 127) fib: Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment, No.46, 2008
- 128) 清宮理, 安本辰也, 本田陵二, 篠田佳男: トンネル内車両火災によるコンクリートの火害と劣化診断, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1129-1134, 2013
- 129) Nabi, Y., Fevziye, A., Leyla, D. Ö., "Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature." *Cement and Concrete Research*, 34, 10, pp.1803-1807, 2004
- 130) Joongwon, L., Kwangho, C., Kappyo, H., "Color and Material Property Changes in Concrete Exposed to High Temperature." *Building Structures and Materials*, 8, 1, pp.175-782, 2009
- 131) Sheng, D., Yuchun, Z., Qiang, S., Weiyi, G., and Kejian, Z., "Experimental study on color change and compression strength of concrete tunnel in a fire." *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, pp.106-114, 2018
- 132) 春畑仁一, 伯井裕樹, 内田慎哉, 池田憲一: 表層透気試験および色彩測定による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1075-1080, 2017
- 133) Lin, W. M., Lin, T. D., Power-Couche, L. J. "Microstructure of Fire-Damaged Concrete." *ACI*

- Materials Journal, 93, 3, pp.199-205, 1996
- 134) Heap, M. J., Lavallée, Y., Laumann, A., Hess, K. U., Meredith, P. G., Dingwell, D. B., Huismann, S., Weise, F., “The influence of thermal-stressing (up to 1000 °C) on the physical, mechanical, and chemical properties of siliceous-aggregate, high-strength concrete.” *Construction and Building Material*, 42, pp.248-265, 2013
 - 135) Pattamad, P., Danupon, T., “Rebound hammer test to estimate compressive strength of heat exposed concrete.” *Construction and Building Materials*, 172, pp.387-395, 2018
 - 136) Kubilay A., “Microstructural examination of concrete exposed to elevated temperature by using plane polarized transmitted light method.” *Construction and Building Materials*, 48, pp.772-779, 2013
 - 137) Muhammad, W., Raja, R. H., “Three-dimensional computer-aided finite element method retrofitting modeling and non-destructive testing techniques for the assessment of actual existing high-rise fire-damaged reinforced concrete building.” *Structural Design of tall and special buildings*, 22, 12, pp.927-940, 2013
 - 138) Rami, H., Haddad, Ruba, A., Odeh, Hala, A., Amawi, Ayman, N. A., “Thermal performance of self-compacting concrete: destructive and nondestructive evaluation.” *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40, 12, pp.1205-1214, 2013
 - 139) 春畑仁一, 阪口明弘, 山根政夫, 皿井剛典: 火害を受けたコンクリートの劣化診断手法の検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.36, No.1, pp.1366-1371, 2014
 - 140) Yubin, C., Qiuyi, L., Zhongxing, W., Rupeng, X., “Reconstruction Technique and Application of Multi Interface Structure Model of Recycled Concrete.” *Guisuanyan Tongbao*, 36, 8, pp.2678-2682, 2017
 - 141) 春畑仁一, 内田慎哉, 岩野聡史, 池田憲一: 火害を受けたコンクリートの反発度・反発速度・機械インピーダンス・接触時間による劣化状態の評価方法の検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.40, No.1, pp.1635-1640, 2018
 - 142) Chhanda, J. N. “Non-destructive testing of concrete by the Schmidt rebound hammer.” *Indian Concrete Journal*, 50, 1, 19-20, 28, 1976
 - 143) Ufuk, D., Michael, L. L., “Comparison of Pulse Velocity and Impact-Echo Findings to Properties of Thin Disks from a Fire Damaged Slab.” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 21, 1, 13-21, 2007
 - 144) Epasto, G., Proverbo, E., Venturi, V., “Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method.” *Materials and Structures*, 43, pp.235-245, 2010
 - 145) 藤原規雄, 西谷慶彦, 春畑仁一, 内田慎哉: 超音波表面走査法による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.1, pp.1993-1998, 2017
 - 146) 岩野聡史, 内田慎哉, 春畑仁一, 渡部正: 弾性波法で得られた接触時間・伝播速度による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.1, pp.1915-1920, 2017
 - 147) 大野健太郎, 前田祐輔, 内田慎哉, 春畑仁一: 弾性波の速度構造による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.1,

- pp.1909-1914, 2017
- 148) Ercolani, G., Ortega N. F., Priano, C., Senas, L., “Physical-mechanical behavior of concretes exposed to high temperatures and different cooling systems.” *Structural Concrete*, 18, 3, 487-495, 2017
 - 149) Iwano, S., Uchida, S., Fumoto, T., Ozawa, M., “Fundamental Study on Deterioration Estimation Method of Fire-Damaged Concrete by the Impact Elastic Wave Method.” *Concrete Reseach and Technology*, 28, 35-45, 2017
 - 150) 岩野聡史, 内田慎哉, 春畑仁一, 渡部正: 火害を受けたコンクリートの衝撃弾性波法による劣化深さの評価方法の検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.40, No.1, pp.1653-1658, 2018
 - 151) 皿井剛典, 田中徹, 澤口哲希: 孔内局部載荷試験による構造物の深さ方向のコンクリート物性評価に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.34, No.1, pp.1828-1833, 2012
 - 152) 澤口啓希, 春畑仁一, 内田慎哉, 池田憲一: 火害を受けたコンクリートの孔内局部載荷法による劣化評価に関する基礎的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.39, No.1, pp.1063-1068, 2017
 - 153) Felicetti, R., “The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete.” *Cement and Concrete Composites*, 28, 4, pp.321-329, 2006
 - 154) 宮川豊章, 大即信明, 清水昭之, 小柳光生, 守分敦郎, 上東泰: *コンクリート補修・補強ハンドブック*, 朝倉書院, pp.425-430, 2011
 - 155) 大浜嘉彦, 鈴木清司, 尾沢秀夫: ポリマーセメントモルタルの難燃性, *コンクリート工学年次講演論文集*, Vol.2, pp.253-256, 1980
 - 156) 大浜嘉彦, 白石田和彦: ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さの温度依存性, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 材料・施工・防火・海洋, pp.165-166, 1982
 - 157) 王徳東, 野口貴文, 濱崎仁, 朴同天: 高温を受けた補修材料の残存強度, *コンクリート年次論文集*, Vol.30, No.2, pp.571-576, 2008
 - 158) 濱崎仁, 野口貴文, 王徳東, 金亨俊: 高温を受けたポリマーセメントモルタルの力学性状, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.31, No.2, pp.1927-1932, 2009
 - 159) 濱崎仁, 茂木武, 野口貴文, 王徳東, 金亨俊: ポリマーセメントモルタルを用いて補修した部材の耐火性能に関する研究 その1 耐火試験における補修部の損傷および温度分布, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.75, No.652, pp.1065-1071, 2010
 - 160) 安藤祐太郎, Sanjay PAREEK: 各種コンクリート及びポリマーセメントモルタルの燃焼特性及び熱伝導特性に関する評価検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.36, No.1, pp.1306-1311, 2014
 - 161) 濱崎仁, 野口貴文, 王徳東, 金亨俊, 吉田正志, 成瀬友宏: 高温を受けたポリマーセメントモルタルの燃焼特性および熱伝導率に関する研究 その1 発熱性試験の結果, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, A-2, pp.159-160, 2008
 - 162) 金亨俊, 野口貴文, 濱崎仁, 王徳東, 吉田正志, 成瀬友宏: ポリマーセメントモルタルの燃焼特性および熱伝導率に関する研究 その2 不燃性試験の結果, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, A-2, pp.161-162, 2008
 - 163) 大濱嘉彦, 國分友貴, 平井篤: 建築用ポリマーセメントモルタルの防火性能及び試験方法の

- 提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.631, pp.1449-1457, 2008.9
- 164) 岡村一臣, 土田恭義: ポリマーセメントモルタルの防耐火性に関する実験研究, フジタ工業技術研究所報, 第20号, pp.107-124, 1984
- 165) 山田人司, 加藤雅樹, 梅本宗宏, 中瀬博一, 松戸正士, 梶田秀幸, 濱崎仁, 茂木武, 閑田徹志, 安田正雪: 補修用ポリマーセメントモルタルの耐火性能評価に関する実験 その2 壁試験体の加熱実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集 (CD-ROM), Vol.2012, pp.1107-1108, 2012
- 166) 日本建設業連合会: RC建築物のかぶり厚さの信頼性向上に関する研究, 2013
- 167) 国土交通省住宅局編集: 平成17年6月1日施行改正建築基準法・同施行令等の解説, ぎょうせい, 2005
- 168) 杉野雄亮, 谷辺徹, 六本木日菜子, 小澤満津雄: リング拘束供試体を適用したアクリル系ポリマーセメントモルタルの火災時の爆裂性状に関する実験的検討, Vol.41, No.1, pp.1001-1006, 2019
- 169) 森田武, 元売正美: ポリマーセメントモルタルの耐火性に関する実験的検討 ーポリマー量, ポリプロピレン短繊維混入率, 層厚の影響ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.2012, pp.391-392, 2014
- 170) 森田武, 元売正美: 鉄筋コンクリート造部材の補修に用いるポリマーセメントモルタルの耐火性に関する検討 ー爆裂の簡易評価方法および爆裂防止用ポリプロピレン短繊維の最適混入量ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.2015, pp.33-34, 2015
- 171) 杉野雄亮, 谷辺徹, 高間孝一郎, 小澤満津雄: 火災時における補修用モルタルの爆裂性状評価手法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1035-1040, 2018
- 172) 住学, 神代泰道, 安部弘康, 柳田淳一, 山崎裕一, 山岸直樹, 三枝輝昭, 吉田敬之, 大岡督尚, 土屋昌洋, 加納嘉: ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した壁試験体の耐火試験 その1 補修施工, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, Vol.2011, pp.283-284, 2011
- 173) 唐沢智之, 道越真太郎, 森田武, 起橋孝徳, 梅本宗宏, 山田人司, 中瀬博一, 梶田秀幸, 馬場重彰, 松戸正士, 遊佐秀逸, 茂木武: ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した壁試験体の耐火試験 (その2 耐火試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.285-286, 2011
- 174) 唐沢智之, 山田人司, 神代泰道, 住学, 吉岡昌洋, 安部弘康, 柳田淳一, 大岡督尚, 野口貴文, 遊佐秀逸, 濱崎仁, 茂木武: ポリマーセメントモルタルを用いて補修施工した壁試験体の耐火試験 その3 金属製メッシュを用いた剥落防止工法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, Vol.2012, pp.1111-1112, 2012
- 175) 梶田秀幸, 濱崎仁, 吉田正志, 小島正朗, 野中英, 高橋祐一, 立松和彦, 和田高清, 山田雅裕: 補修用ポリマーセメントモルタルの力学性状および発熱性状に関する実験 その2 接着性および発熱性状に関する結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.147-148, 2010
- 176) 国土交通省: 15.防火・避難対策等に関する実験的検討, 平成22年度建築基準法整備促進事

- 業, <<http://www.mlit.go.jp/common/001131696.pdf>>, 2011
- 177) 鈴木好幸, 濱崎仁, 閑田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 野中英, 山田人司: 補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性および吸発熱特性に関する実験 その3 熱分析の結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.281-282, 2011
- 178) 鈴木好幸, 濱崎仁, 遊佐秀逸, 野口貴文, 閑田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 道越真太郎, 野中英, 山田人司: 補修用ポリマーセメントモルタルの耐火性評価に関する実験, その3 耐爆裂性の評価方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.1555, pp.1109-1110, 2012
- 179) 田嶋仁志, 岸田政彦, 春日清志, 神田亨, 森田武: 耐火試験後のRCセグメントを用いた熱劣化特性及び補修性に関する実験研究, トンネル工学報告集, Vol.15, pp.287-292, 2005
- 180) 森田武, 田中博一, 元売正美, 奥山圭也: 無機系吹付け補修材の耐火性状に関する実験的検討, 土木学会第62回年次学術講演会講演梗概集, V-604, pp.1207-1208, 2007
- 181) 後藤徹, 林裕悟: 耐火セグメントの加熱実験報告, 土木学会年次学術講演会梗概集, Vol.60, VI-320, pp.637-638, 2005
- 182) 関伸司, 森田武, 林裕悟, 中川拓也: 耐火セグメントの加熱実験報告 その2, 土木学会年次学術講演会講演梗概集, Vol.60, VI-121, pp.241-242, 2005

第3章 耐爆裂性の確保技術

3.1 はじめに

本章では、シールドトンネルの耐火工を構築する際に、覆工コンクリート自体に耐火性を付与するため、PP 繊維を混入したコンクリートを対象とし、耐爆裂性に影響を及ぼす要因について検討した。既往の研究により、爆裂の発生においては、コンクリートの水セメント比、含水率、骨材の種類、混和材料の種類、加熱条件、有機繊維の形状や混入量など、さまざまな要因が影響を及ぼすことが報告されている¹⁾。これらの要因の中で、コンクリートの含水率は実構造物では制御することが難しい。骨材の種類についても、プラントで使用している骨材を使用することが多く、最適な骨材を使用できない場合が多い。加熱条件については2章で述べたが、国内のシールドトンネルにおける覆工コンクリートの耐火性を検証する際には、トンネル火災を想定した RABT 曲線を使用することが多く²⁾、首都高速道路株式会社的设计要領にも規定されている³⁾。

そのため、実際に耐火工を構築する場合、施工者の自由度が許容される条件には、結合材の種類、コンクリートの水セメント比および有機繊維の選定が挙げられる。建築分野においては、長年研究が進められており、ISO 曲線を用いた検討事例は多いが、RABT 曲線を用いた研究事例は比較的少なく、使用材料や配合選定の具体的な方法については、体系化されていない。一方、RABT 曲線は、ISO 曲線に比べて加熱速度や初期の加熱温度が高く、爆裂に対して厳しい条件になっている²⁾。そこで、本章では、PP 繊維の形状や混入量、コンクリートの水結合材比に検討対象を絞り、RABT 曲線を用いた耐火実験により、爆裂を抑制できる最適な材料や配合を提案することを目的とした。

3.2 実験概要

3.2.1 実験ケース

耐爆裂性を検証するために、コンクリート平板を用いた耐火実験を行った。実験は2つのシリーズに大別して行った。最初の実験シリーズⅠでは、直径や長さの異なる5種類のPP繊維を用いて、爆裂の抑制に最適な繊維の形状を見出すこととした。また、結合材の種類が爆裂に影響を及ぼすとの知見^りや、コンクリートの流動性が増大すると爆裂しやすくなること、鋼繊維が爆裂の抑制に効果的であることなどの知見もあるため^り、結合材の種類を変えた配合や鋼繊維を使用した配合についても検討を行った。

次の実験シリーズⅡでは、実験シリーズⅠで選定した最適な2種類のPP繊維を用いて、コンクリートの強度水準や繊維の混入率が爆裂に及ぼす影響について検討を行った。水結合材比の低下に伴い耐爆裂性が低下するとの知見もある^りため、強度水準に応じたPP繊維の混入率を見出すこととした。

3.2.2 耐火実験用の試験体

試験体の概略図を図3-1に示す。試験体の形状は、シールドトンネルの覆工コンクリートを模倣して幅500×長さ1000×厚さ200mmのコンクリート平板とした。配筋は、D10を100mm間隔で2段に配置し、かぶりは50mmとした。

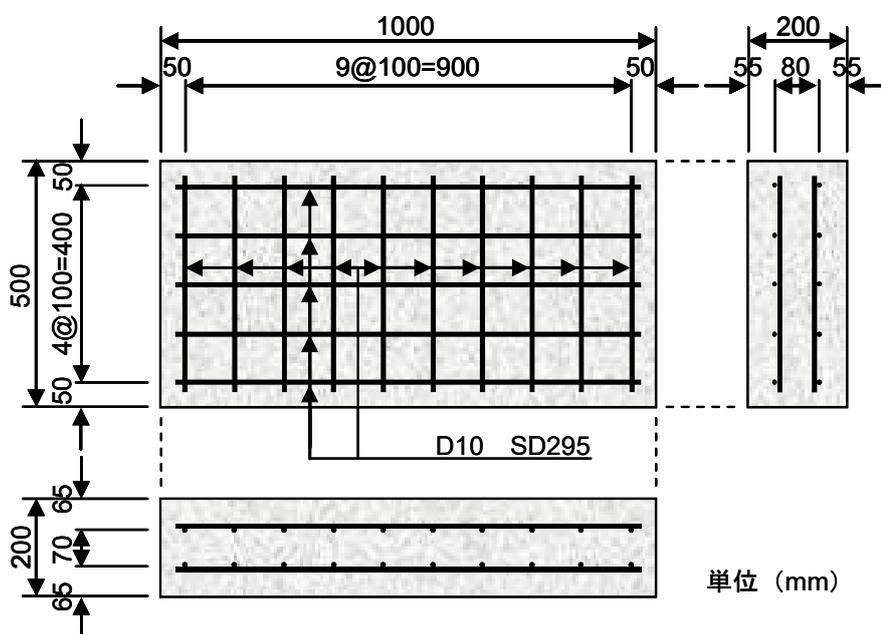


図 3-1 試験体概略図

3.2.3 耐火実験

耐火実験の概略図を図 3-2 に示す。耐火実験には、壁用の耐火炉を使用した。炉内に配置されている 4 個のバーナーにより昇温し、輻射熱により炉内を加熱した。耐火実験は一面加熱とし、耐火炉に設置する炉蓋に、試験体を 2 体並行に設置して加熱を行った。試験体の側面から熱の出入りがないように、試験体の周辺には、断熱材を設置した。

加熱曲線として、2 章でも記述したトンネル火災を想定したドイツ規格の RABT 曲線を採用した。図 3-3 に示すとおり、加熱開始後 5 分で最高温度の 1200℃まで昇温し、最高温度を 60 分まで保持した後、110 分間で降温した。炉内の温度管理は、試験体の加熱面から 10cm 離れた箇所に配置した熱電対を用いて行った。

耐火実験時は、炉内温度、爆裂の発生する時間および試験体表面の目視観察を行った。試験体表面の状況は、炉壁の窓に設置した耐熱用の CCD カメラと窓から直接目視により観察した。耐火実験後は、外観調査と爆裂深さの測定を行った。爆裂深さは、試験体の表面を 50mm 間隔の格子に分割し、その交点ごとにノギスを用いて測定した。測定値の最大値を最大爆裂深さ、各測点の測定値を平均した値を平均爆裂深さとした。また、爆裂が認められた測点数を全測点数で除した値を、爆裂面積率として評価した。

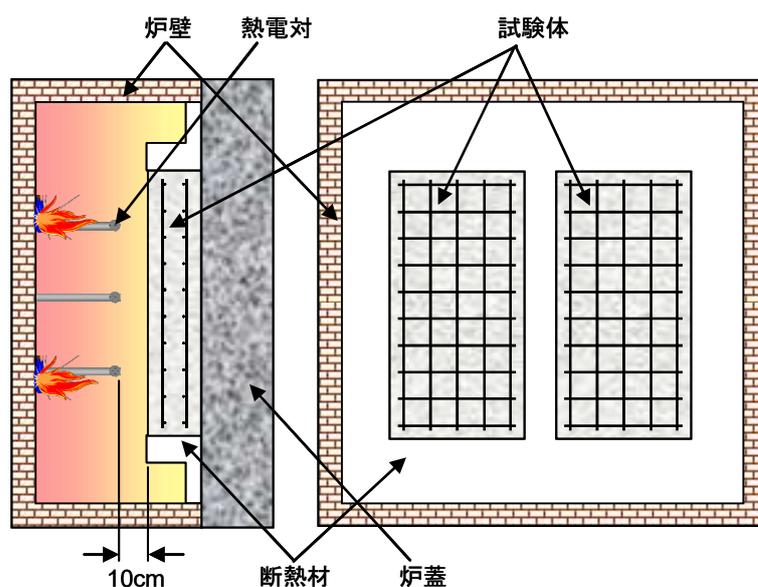


図 3-2 耐火実験の概略

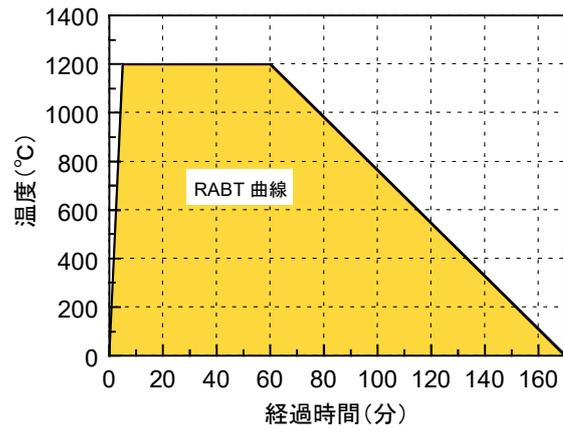


図 3-3 RABT 曲線

3.3 最適な PP 繊維の提案 (実験シリーズ I)

3.3.1 実験概要

爆裂の抑制に効果的な PP 繊維の種類を選定するために、織度や長さの異なる 5 種類の繊維を用いて実験を行った。PP 繊維の種類の一覧を表 3-1 に示す。また、PP 繊維の外観を写真 3-1 に示す。PP 繊維の直径は、繊維の断面が円形であるものと仮定して、織度から換算して算出した。併せて、繊維の長さとの換算直径の比率からアスペクト比を算出した。実験に使用したコンクリートの材料を表 3-2 に示す。また、実験ケースを表 3-3 に示す。

コンクリートの種類は、スランプタイプと高流動タイプの 2 種類とし、高流動タイプは、粉体系と増粘剤系の 2 種類とした。粉体系の高流動タイプには 3 種類の混和材を使用し、高炉スラグ微粉末 (以下、粉体系 BS と呼称)、フライアッシュ (以下、粉体系 FA と呼称) および石灰石微粉末 (以下、粉体系 LS と呼称) を使用した。また、補強繊維として、鋼繊維の有無についても併せて検討を行った。

表 3-1 PP 繊維の一覧

PP繊維の種類	織度 (dtex)	換算直径 (μm)	長さ (mm)	アスペクト比
A	3500	700	48	69
B	2.2	17.5	2	114
C	17	48.8	20	410
D	2.2	17.5	10	570
E	2.2	17.5	15	855



写真 3-1 PP 繊維の外観

表 3-2 使用材料

種類	記号	各材料の種類および物性
練混ぜ水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
混和材	BS	高炉スラグ微粉末, 密度2.89g/cm ³
	FA	フライアッシュ I 種, 密度2.40g/cm ³
	LP	石灰石微粉末, 密度2.71g/cm ³
細骨材	S	砂, 密度2.62g/cm ³ , 粗粒率2.60
粗骨材	G	碎石, 密度2.65g/cm ³ , 粗粒率6.61
混和剤	VM	セルロース系増粘剤
	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤
短繊維	SF	鋼繊維, 密度7.85g/cm ³ , (直径0.6×長さ30mm)
	PP	PP繊維(形状の異なる5種類の繊維), 密度0.91g/cm ³

表 3-3 実験ケース

鋼繊維の有無	コンクリートの種類		PP繊維の種類 (下段: アスペクト比)				
			A (69)	B (114)	C (410)	D (570)	E (855)
無し	スランプタイプ		—	—	○	—	—
	高流動タイプ	粉体系BS	○	○	○	○	—
有り	スランプタイプ		—	○	○	○	—
	高流動タイプ	粉体系LP	—	—	○	○	—
		粉体系FA	○	—	○	○	○
		粉体系BS	—	—	—	○	—
		増粘剤系	—	○	○	○	—

実験に使用したコンクリートの配合の一覧を表 3-4 に示す。スランプタイプと増粘剤系の高流動タイプについては、結合材として普通ポルトランドセメントを使用した。セグメントには高強度コンクリートが使用されるため、圧縮強度が 80N/mm^2 程度となるよう、配合を組み立てた。水セメント比は 36%とした。粉体系の高流動タイプには、混和材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび石灰石微粉末を使用した。高炉スラグ微粉末については水結合材比を 28.8%とし、結合材の 50%を内割置換した。フライアッシュおよび石灰石微粉末については、水セメント比を 36%とし、セメントの 20%を外割で添加して水粉体比を 28.8%とし、強度水準を同程度とした。PP 繊維の混入率はいずれも 0.2vol.%とした。

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサを用いて行い、ベースコンクリートを 2 分間練り混ぜた後、繊維を投入しさらに 1 分間練り混ぜた。試験体を作製後屋内にて保管し、材齢 28 日以降に耐火実験を実施した。

表 3-4 配合の一覧

コンクリートの種類	混和材の種類	鋼繊維の有無	繊維の種類	W/P (%)	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)								耐火実験時の圧縮強度 (N/mm ²)		
								W	C	BS	FA	LP	S	G	SF		PP	VM
スランブタイプ	-		C	36.0	36.0	36.0	55.7	472	-	-	-	949	764	-	0.2	-	0.750	75.6
				28.8	28.8	57.6	58.7	330	330	-	-	864	614	-	0.2	-	0.900	78.5
				28.8	28.8	57.6	56.2	356	356	-	-	779	614	-	0.2	-	0.900	82.1
				28.8	28.8	57.6	56.2	356	356	-	-	779	614	-	0.2	-	0.900	80.5
スランブタイプ	BS		D	28.8	28.8	57.6	54.4	373	373	-	-	724	614	-	0.2	-	0.900	79.0
				36.0	36.0	36.0	55.7	472	-	-	941	757	47	0.2	-	0.750	78.1	
				36.0	36.0	36.0	55.7	472	-	-	941	757	47	0.2	-	0.750	81.3	
				36.0	36.0	36.0	55.7	500	-	-	913	735	47	0.2	-	0.750	76.3	
高流動タイプ (粉体系)	FA	有り	D	28.8	28.8	57.6	53.8	373	373	-	-	708	614	47	0.2	-	0.900	76.1
				28.8	28.8	36.0	62.5	444	-	111	-	1010	614	47	0.2	-	0.900	86.0
				28.8	28.8	36.0	61.8	458	-	115	-	981	614	47	0.2	-	0.900	81.7
				28.8	28.8	36.0	59.6	500	-	125	-	896	614	47	0.2	-	0.900	79.1
高流動タイプ (増粘剤系)	LP		E	28.8	28.8	36.0	57.2	542	-	135	-	811	614	47	0.2	-	0.900	77.6
				28.8	28.8	36.0	60.7	486	-	-	122	939	614	47	0.2	-	0.900	79.9
				28.8	28.8	36.0	57.7	541	-	-	135	829	614	47	0.2	-	0.900	78.7
				36.0	36.0	36.0	61.2	542	-	-	-	958	614	47	0.2	0.3	0.900	73.8
高流動タイプ (増粘剤系)	-		C	36.0	36.0	36.0	61.2	542	-	-	-	958	614	47	0.2	0.3	0.900	76.6
				36.0	36.0	36.0	59.3	583	-	-	-	885	614	47	0.2	0.3	0.900	76.6

※B: 結合材 (C, FA, BSの合計), P: 粉体 (BとLPの合計)

高流動タイプについて、PP 繊維のアスペクト比と単位水量の関係を図 3-4 に、PP 繊維の表面積と単位水量の関係を図 3-5 に示す。目標のスランプフローを確保するには、PP 繊維のアスペクト比や表面積の増加に伴い、単位水量の増加が必要となった。アスペクト比の大きい PP 繊維を使用するほど、繊維表面に拘束されるペースト量が增大するとともに流動性の低下を招くため、単位水量が増加すると考える。

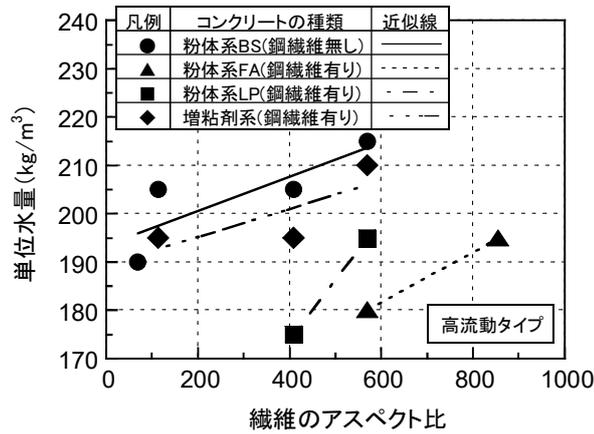


図 3-4 繊維のアスペクト比と単位水量の関係（高流動タイプ）

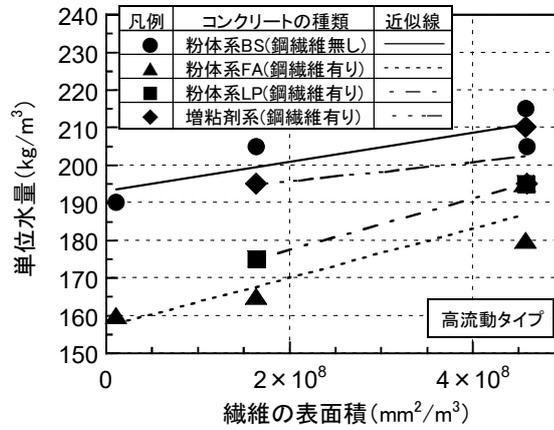


図 3-5 繊維の表面積と単位水量の関係（高流動タイプ）

3.3.2 実験結果および考察

爆裂は、いずれも加熱開始後2～2分30秒程度経過し、炉内温度が500～600℃位に達した時点で発生し、概ね5～10分程度経過した時点で収まり、その後は進行しなかった。CCDカメラで撮影した炉内状況の一例を写真3-2に示す。爆裂は、5～10cm位の円形で厚さ数mm～10mm程度のコンクリート片が、表層から剥離して発生した。爆裂の軽微な試験体については、数か所剥離して収束したが、損傷が大きい試験体については、コンクリート片が断続的に剥離し、爆裂範囲が重なり合って、層状に損傷を受け、広範囲にわたって爆裂が発生した。

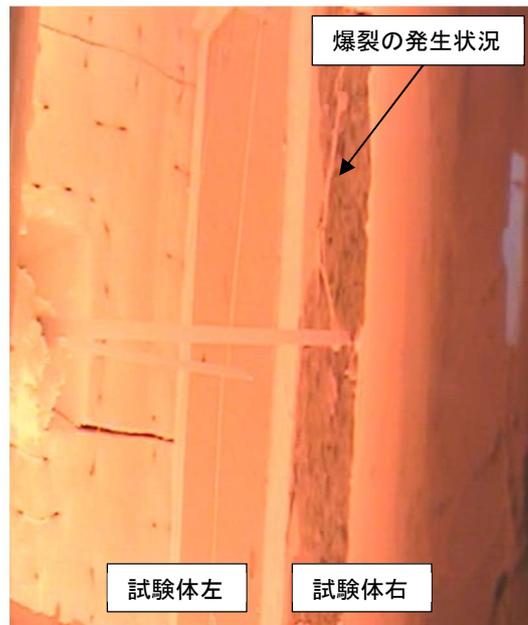


写真 3-2 炉内の状況

爆裂深さの測定結果を表 3-5 に、爆裂深さの分布図を表 3-6 に、平均爆裂深さと最大爆裂深さの関係を図 3-6 に、爆裂面積率と最大爆裂深さの関係を図 3-7 に示す。最大爆裂深さ、平均爆裂深さおよび爆裂面積率において相関関係が認められた。爆裂の状況から考えて、局所的な剥離は認められず、加熱面に平均的に爆裂が生じていた。

表 3-5 爆裂深さの測定結果

コンクリートの種類	混和材の種類	鋼繊維の有無	繊維の種類	繊維のアスペクト比	繊維の表面積 (mm ² /m ³)	爆裂深さ(mm)		爆裂面積率 (%)
						最大	平均	
スランプタイプ	—	無し	C	410	1.64E+08	5	0.1	4.8
高流動タイプ (粉体系)	BS		A	69	1.15E+07	66	22.4	77.1
			B	114	4.59E+08	38	10.7	61.9
			C	410	1.64E+08	14	1.5	22.1
			D	570	4.58E+08	8	0.7	12.6
スランプタイプ	—		B	114	4.59E+08	12	1	21.2
			C	410	1.64E+08	3	0.1	8.7
			D	570	4.58E+08	3	0.1	5.2
高流動タイプ (粉体系)	BS		D	570	4.58E+08	2	0	0
	FA		A	69	1.15E+07	32	8.1	83.1
			C	410	1.64E+08	8	0.4	14.3
			D	570	4.58E+08	2	0	2.2
			E	855	4.57E+08	14	0.7	17.3
	LP	C	410	1.64E+08	4	0.1	6.1	
		D	570	4.58E+08	8	0.3	9.5	
高流動タイプ (増粘剤系)	—	B	114	4.59E+08	28	5.7	56.7	
		C	410	1.64E+08	7	0.4	12.6	
		D	570	4.58E+08	0	0	0	

表 3-6 爆裂深さの分布図

鋼繊維の有無	コンクリートの種類	PP繊維の種類 (下段:アスペクト比)				
		A (69)	B (114)	C (410)	D (570)	E (855)
無し	高流動タイプ 粉体系BS					
	スランブタイプ					
有り	高流動タイプ 粉体系LP					
	高流動タイプ 粉体系FA					
	高流動タイプ 粉体系BS					
	高流動タイプ 増粘剤系					

爆裂深さ(mm)

- 50~70
- 30~50
- 20~30
- 10~20
- 5~10
- 0~5
- 0 (爆裂無)

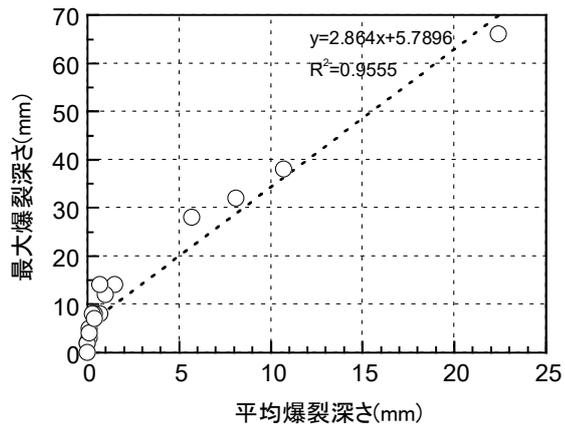


図 3-6 平均爆裂深さと最大爆裂深さの関係

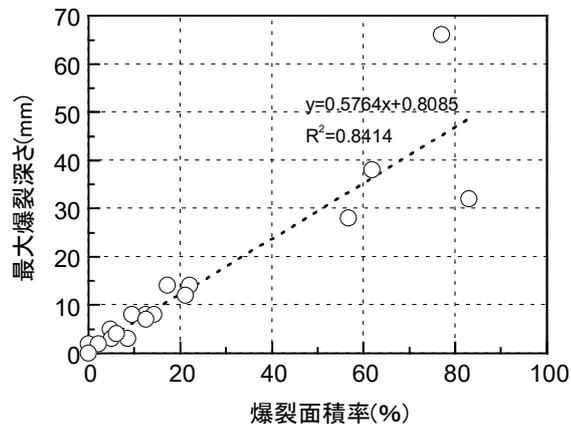


図 3-7 爆裂面積率と最大爆裂深さの関係

PP 繊維のアスペクト比と最大爆裂深さとの関係を図 3-8 に、平均爆裂深さとの関係を図 3-9 に示す。アスペクト比の増加に伴い、爆裂深さが低減する傾向が認められた。アスペクト比が 410～570 の PP 繊維を使用することで爆裂深さを低減できることを確認した。アスペクト比が 855 の PP 繊維 (E) の試験体については、アスペクト比 570 の試験体よりも爆裂の程度が大きくなった。アスペクト比が大きく繊維の分散性が悪いことや単位水量の増加が原因として考えられる。

爆裂深さについて、結合材の種類による顕著な差異は認められないが、高流動タイプに比べて、スランプタイプの方が、爆裂深さが小さい結果となり、浦野らの知見と同様な傾向であった⁵⁾。爆裂の発生要因として、加熱によるコンクリート中に含まれる自由水や水和物の分解による水蒸気の発生が考えられるため、単位水量や単位ペースト量が少なく、爆裂深さが低下したものと考える。また、鋼繊維の有無によっても爆裂深さに顕著な差異は認められなかった。浦野ら⁵⁾は、鋼繊維の混入によって爆裂深さを抑制できるとしている。これは、鋼繊維の架橋効果により爆裂深さが低減したと推測される。本実験でも、鋼繊維の混入により爆裂深さの低減効果が認められる。しかし、アスペクト比が 410～570 の範囲においては、PP 繊維の爆裂の抑制効果が高く、鋼繊維の有無で有意な差は認められず、PP 繊維のみでも爆裂を十分抑制できた。

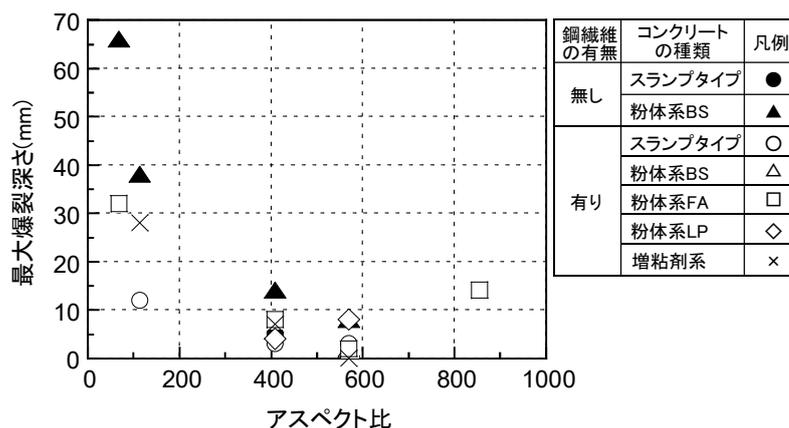


図 3-8 PP 繊維のアスペクト比と最大爆裂深さの関係

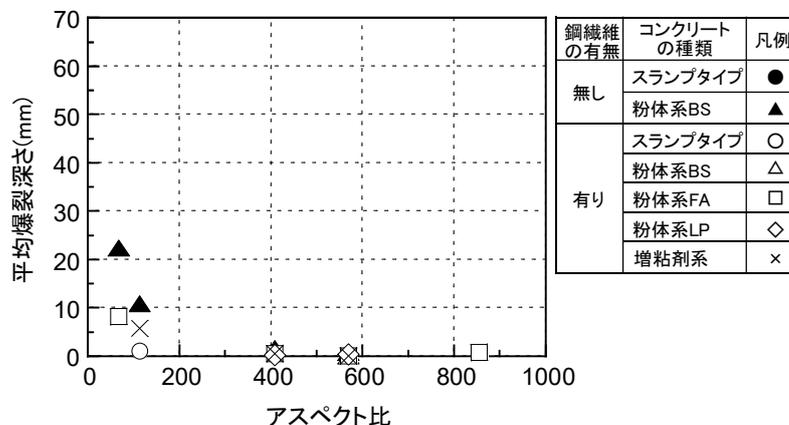


図 3-9 PP 繊維のアスペクト比と平均爆裂深さの関係

繊維の表面積と最大爆裂深さの関係を図 3-10 に、平均爆裂深さとの関係を図 3-11 に示す。吉田ら⁹⁾は、アスペクト比 417, 556 および 1000 の 3 種類の繊維で実験を行っており、繊維の表面積と爆裂深さの間に相関があるとしている。しかし、今回の実験結果では、表面積を増加しても、必ずしも爆裂深さは低減されなかった。直径が小さく、表面積の大きい繊維を使用しても、長さが短いと爆裂深さが増加している。したがって、耐爆裂性の確保に向けて、水蒸気圧を逃がすための連通した空隙を形成するには、ある程度長さが長くアスペクト比の大きい繊維が効果的であると考えられる。

本実験の結果から、耐爆裂性の確保に最適な PP 繊維のアスペクト比は 410~570 の範囲であり、繊維度 17dtex×長さ 20mm および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm の 2 種類の PP 繊維を使用することで効果的に爆裂を抑制できることが判った。

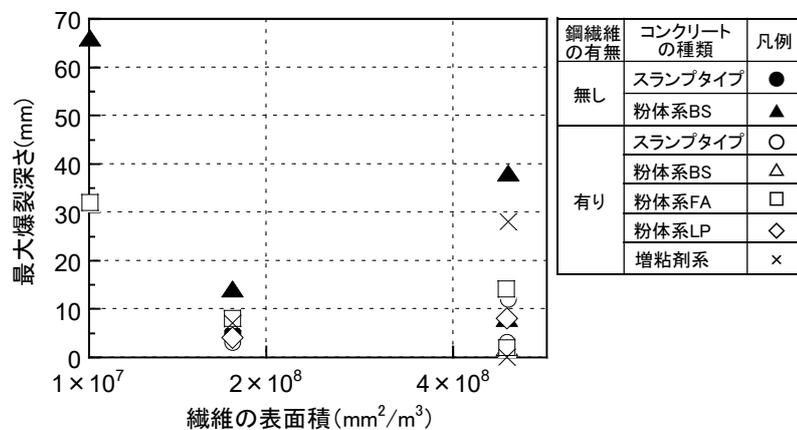


図 3-10 PP 繊維の表面積と最大爆裂深さの関係

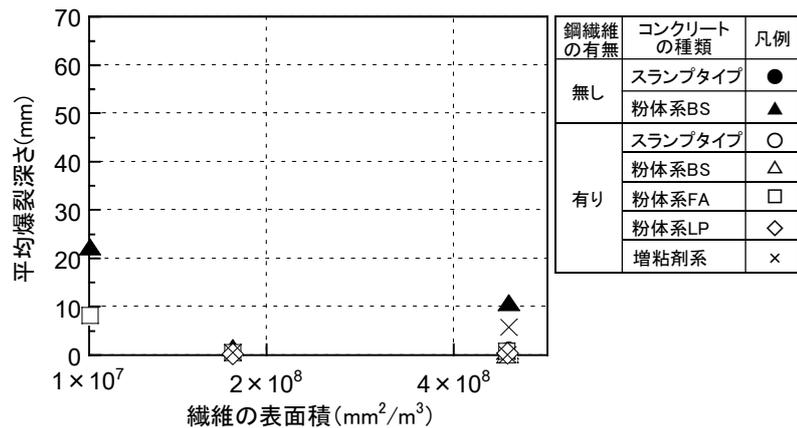


図 3-11 PP 繊維の表面積と平均爆裂深さの関係

3.4 強度水準に応じた PP 繊維の混入率の提案（実験シリーズⅡ）

3.4.1 実験概要

3.3 節の結果から、爆裂に対しては、直径が小さく、アスペクト比の大きい PP 繊維を使用することで爆裂を低減できることや、結合材の種類による顕著な違いは認められないことを確認した。そこで、本節では、3.3 節の結果から、爆裂の抑制に効果的な 2 種類の PP 繊維を用いて、コンクリートの強度水準が爆裂に及ぼす影響や爆裂の抑制に必要な PP 繊維の混入率を確認した。

実験シリーズⅡで使用した材料を表 3-7 に、実験ケースを表 3-8 に示す。また、コンクリートの配合の一覧を表 3-9 に示す。

PP 繊維には、アスペクト比の 410 の繊維（繊維度 17dtex×長さ 20mm）（PP1）とアスペクト比 570 の繊維（繊維度 2.2dtex×長さ 10mm）（PP2）の 2 種類の繊維を使用した。水結合材を 55.0, 45.0, 40.0, 35.0, 30.0 および 28.8% の 6 水準とし、強度レベルを変えて実験を行った。各水結合材比に対して PP 繊維の混入率をそれぞれ変化させた。

水結合材比 30.0～55.0% の配合については、PP1 と PP2 の両者ともに PP 繊維の混入率を 0.05vol.% および 0.10vol.% とし、28.8% の配合については、0.15vol.% および 0.20vol.% とした。PP 繊維を混入しない配合も併せて実験を行った。PP1 を混入する配合については、PP2 と比べて爆裂深さの増加が懸念されるため、水結合材比 35.0% の配合については 0.15vol.% および 0.20vol.% を追加し、水結合材比 28.8% の配合については、0.25vol.% および 0.30vol.% のケースを追加した。

コンクリートの種類は 2 種類とした。水結合材比 40.0% 以上のコンクリートについては、スランプタイプとし、スランプ 15cm を目標とした。水結合材比 35.0% 以下のコンクリートについては、高流動タイプとし、スランプフロー 60cm を目標とした。混和材にはグリーン調達や耐久性向上の観点から高炉スラグ微粉末を使用した。結合材として、スランプタイプには高炉セメント B 種を使用し、高流動タイプには普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を 50% ずつ混合して使用した。材料分離の認められない範囲で混和剤の添加率を増加し、できるだけ単位水量の低減を図った。

コンクリートの練混ぜは、実験シリーズⅠと同様に二軸強制練りミキサを用いて行い、ベースコンクリートを 2 分間練り混ぜた後、繊維を投入しさらに 1 分間練り混ぜた。試験体を作製後屋内にて保管し、材齢 28 日以降に耐火実験を実施した。

表 3-7 使用材料

種類	記号	各材料の種類および物性
練混ぜ水	W	水道水
セメント	C1	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm^3
	C2	高炉セメントB種, 密度 3.04g/cm^3
混和材	BS	高炉スラグ微粉末, 密度 2.89g/cm^3
細骨材	S	砂, 密度 2.62g/cm^3 , 粗粒率2.60
粗骨材	G	碎石, 密度 2.65g/cm^3 , 粗粒率6.61
減水剤	WR1	AE減水剤
	WR2	AE減水剤(高機能タイプ)
	SP	高性能AE減水剤
短繊維	PP1	PP繊維(織度17dtex×長さ20mm, 密度 0.91g/cm^3)
	PP2	PP繊維(織度2.2dtex×長さ10mm, 密度 0.91g/cm^3)

表 3-8 実験ケース

PP繊維の混入率 (vol.%)		水結合材比(%)					
		スランプタイプ			高流動タイプ		
		55.0	45.0	40.0	35.0	30.0	28.8
PP無し	0.00	○	○	○	○	○	—
PP1	0.05	○	○	○	○	○	—
	0.10	○	○	○	○	○	—
	0.15	—	—	—	○	—	○
	0.20	—	—	—	○	—	○
	0.25	—	—	—	—	—	○
	0.30	—	—	—	—	—	○
PP2	0.05	○	○	○	○	○	—
	0.10	○	○	○	○	○	—
	0.15	—	—	—	—	—	○
	0.20	—	—	—	—	—	○

表 3-9 配合の一覧

コンクリートの種類	W/B (%)	繊維の種類	繊維の混入率	単位量(kg/m ³)						混和剤添加率(B×%)			耐火実験時の圧縮強度(N/mm ²)
				W	C1	C2	BS	S	G	WR1	WR2	SP	
スランブタイプ	55.0	無し	無し	175	—	318	—	867	913	0.250	—	—	30.1
			PP1	0.05	175	—	318	—	867	913	—	0.850	—
		PP1	0.10	175	—	318	—	867	913	—	1.000	—	33.5
			0.05	175	—	318	—	867	913	—	1.300	—	34.2
		PP2	0.10	175	—	318	—	867	913	—	1.600	—	33.1
			無し	無し	175	—	389	—	803	916	—	0.700	—
	45.0	PP1	0.05	175	—	389	—	803	916	—	1.000	—	39.4
			0.10	175	—	389	—	803	916	—	1.200	—	42.3
		PP2	0.05	175	—	389	—	803	916	—	1.150	—	44.2
			0.10	175	—	389	—	803	916	—	1.400	—	40.5
	40.0	無し	無し	165	—	413	—	789	936	—	—	0.650	48.3
			PP1	0.05	165	—	413	—	789	936	—	—	0.750
PP1		0.10	165	—	413	—	789	936	—	—	0.850	47.5	
		0.05	165	—	413	—	789	936	—	—	0.850	48.6	
PP2		0.10	165	—	413	—	789	936	—	—	1.000	49.1	
高流動タイプ	35.0	無し	無し	175	250	—	250	811	875	—	—	1.000	61.6
			PP1	0.05	200	286	—	286	735	822	—	—	0.875
		PP1	0.10	200	286	—	286	735	822	—	—	0.900	59.8
			0.15	215	307	—	307	724	755	—	—	0.700	57.4
			0.20	230	329	—	329	712	689	—	—	0.700	59.0
		PP2	0.05	210	300	—	300	684	822	—	—	0.825	66.2
			0.10	210	300	—	300	684	822	—	—	0.850	61.2
	30.0	無し	無し	175	292	—	292	738	875	—	—	1.000	72.6
			PP1	0.05	190	317	—	317	708	822	—	—	0.950
		PP1	0.10	190	317	—	317	708	822	—	—	1.025	71.4
			0.05	200	333	—	333	653	822	—	—	0.900	74.5
		PP2	0.10	200	333	—	333	653	822	—	—	0.925	76.0
28.8	PP1	0.15	200	347	—	347	836	611	—	—	1.000	75.6	
		0.20	200	347	—	347	836	611	—	—	1.025	79.0	
		0.25	210	365	—	365	820	543	—	—	1.000	75.1	
		0.30	215	373	—	373	885	477	—	—	1.000	74.5	
	PP2	0.15	215	373	—	373	752	611	—	—	0.950	76.3	
		0.20	215	373	—	373	752	611	—	—	1.000	78.9	

※B: 結合材(C1, C2, BSの合計)

3.4.2 実験結果および考察

爆裂は、実験シリーズ I と同様に、いずれも加熱開始後 2~2 分 30 秒程度経過し、炉内温度が 500~600℃位に達した時点で発生し、概ね 5~10 分程度経過した時点までで収まり、その後は進行しなかった。

爆裂深さの測定結果を表 3-10 に示す。また、爆裂深さの分布図を表 3-11 および表 3-12 に示す。アスペクト比の異なる 2 種類の PP 繊維を用いたが、アスペクト比が大きい PP2 の方が、爆裂深さが小さい結果であり、実験シリーズ I の図 3-8 と同様の結果であり、再現性が確認できた。また、水結合材比の低減に伴い爆裂深さが増加し、PP 繊維の混入量の増加に伴い爆裂深さが減少しており、既往の知見と同様の傾向であったり。

平均爆裂深さと最大爆裂深さの関係を図 3-12 に、爆裂面積率と最大爆裂深さの関係を図 3-13 に示す。実験シリーズ I の図 3-6 および図 3-7 に示した結果と同様に、PP 繊維の種類や混入率、水結合材比が変化しても、最大爆裂深さ、平均爆裂深さおよび爆裂面積率の間には相関関係があることが判る。

表 3-10 爆裂深さの測定結果

PP繊維の 混入率 (容積比)(%)		水結合材比(%)																	
		55.0			45.0			40.0			35.0			30.0			28.8		
		爆裂深さ(mm)		爆裂 面積率 (%)	爆裂深さ(mm)		爆裂 面積率 (%)	爆裂深さ(mm)		爆裂 面積率 (%)									
		最大	平均		最大	平均		最大	平均		最大	平均		最大	平均		最大	平均	
PP無し	0.00	3	0.1	2.6	16	2.8	31.2	25	6.2	51.9	32	6.0	50.2	61	20.1	73.2	-	-	-
PP1	0.05	0	0.0	0.0	3	0.0	0.9	17	1.6	23.8	27	6.0	50.2	43	9.5	58.4	-	-	-
	0.10	2	0.0	0.4	3	0.0	1.3	5	0.0	0.4	13	1.2	19.0	28	3.6	34.6	-	-	-
	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	0.5	12.1	-	-	-	29	7.6	58.9
	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.0	0.4	-	-	-	22	1.7	35.5
	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	1.4	32.5
	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	0.3	10.8
PP2	0.05	3	0.0	1.7	3	0.0	1.3	3	0.0	0.4	19	3.2	29.9	38	6.3	52.4	-	-	-
	0.10	3	0.0	1.7	3	0.0	0.4	0	0.0	0.0	2	0.0	0.4	9	0.5	8.2	-	-	-
	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16	0.6	20.3
	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	0.4	12.6

表 3-11 爆裂深さの分布図 (PP1)

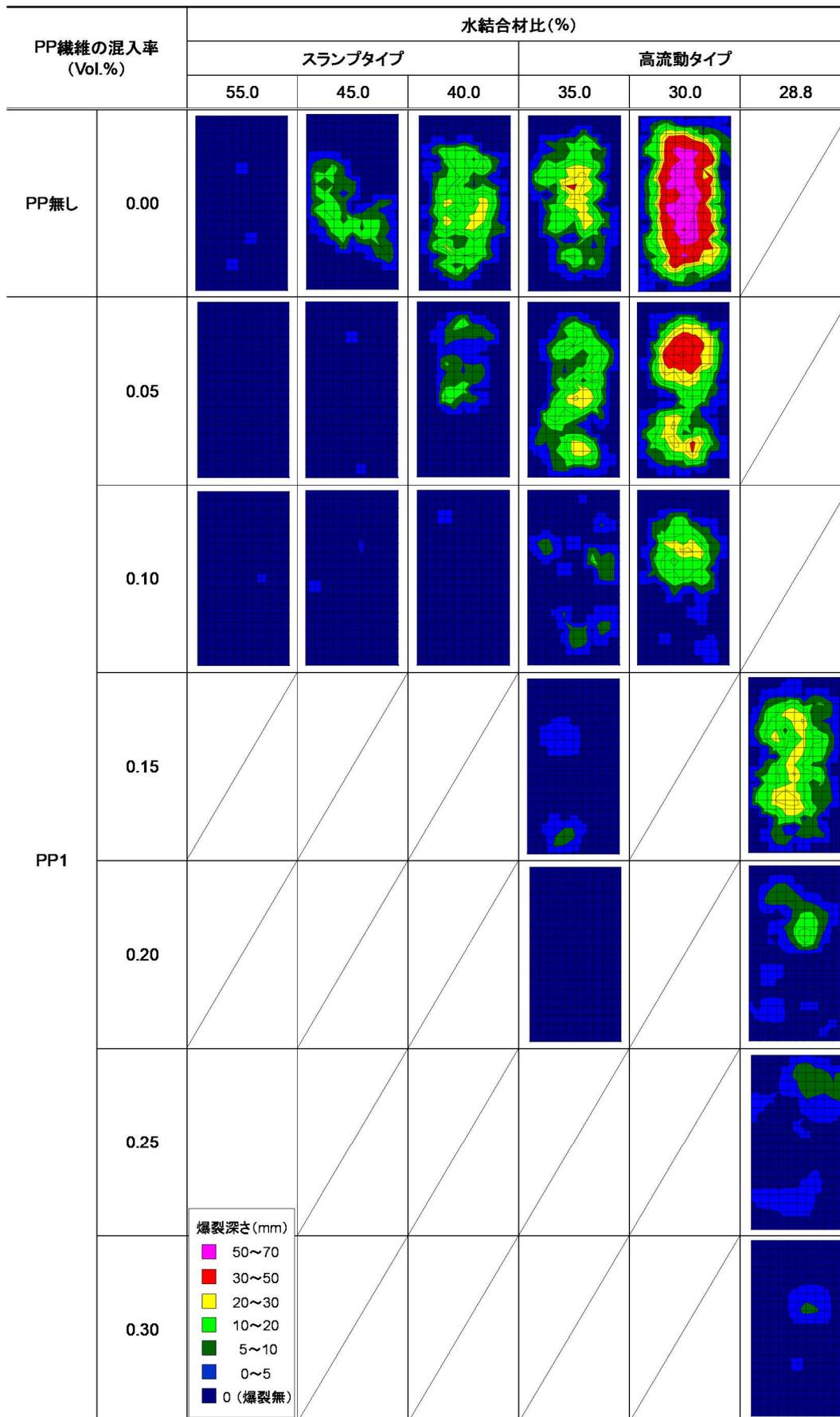
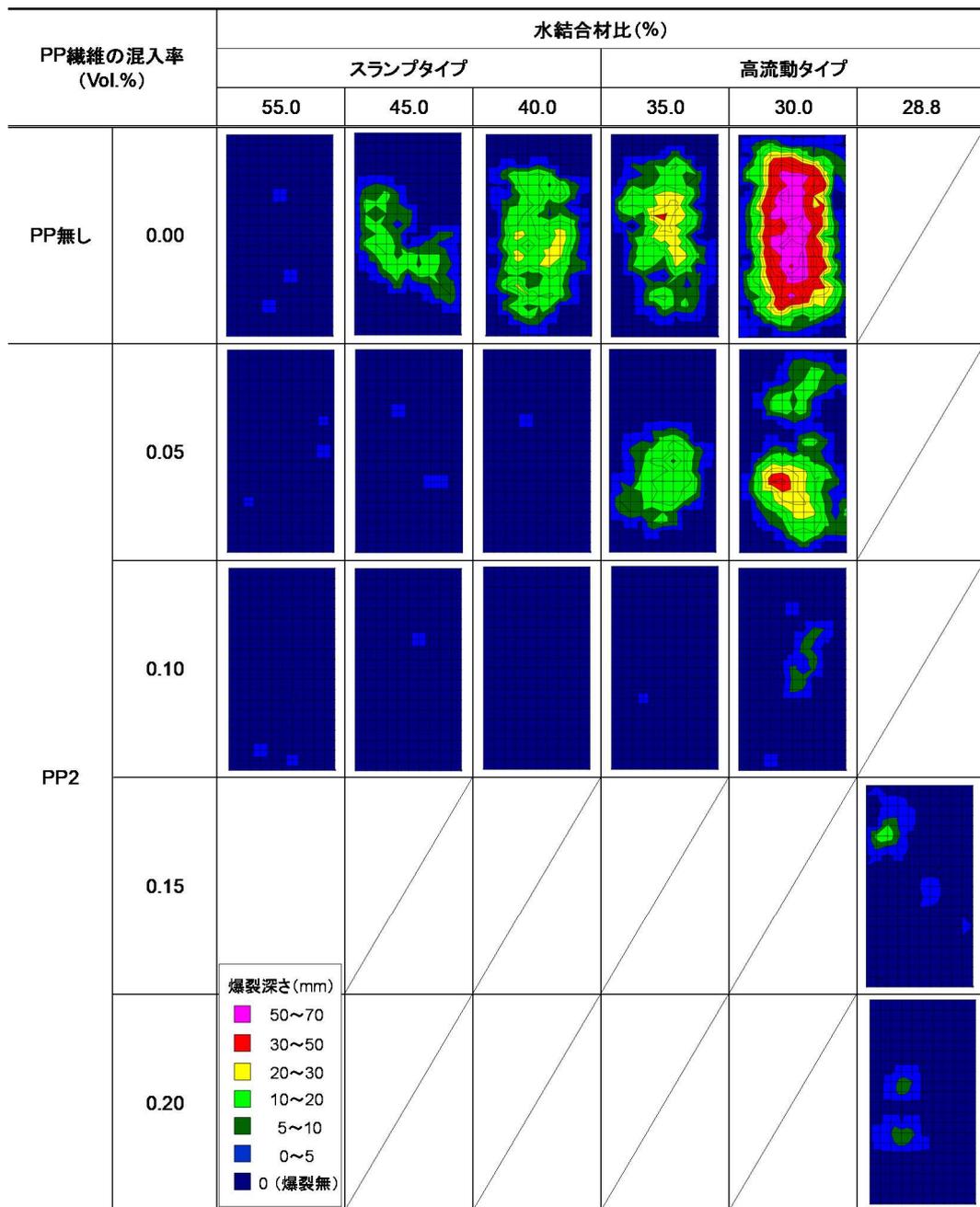


表 3-12 爆裂深さの分布図 (PP2)



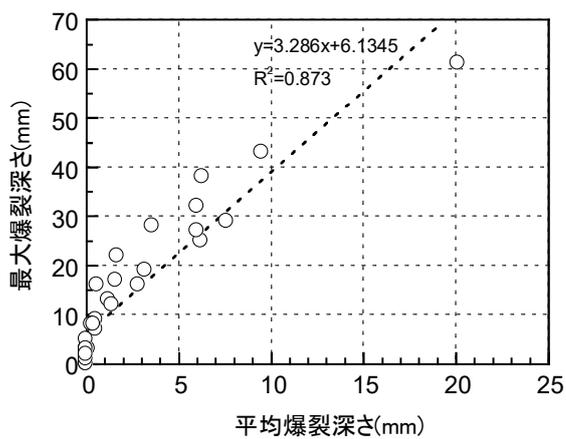


図 3-12 平均爆裂深さと最大爆裂深さの関係 (PP1, PP2)

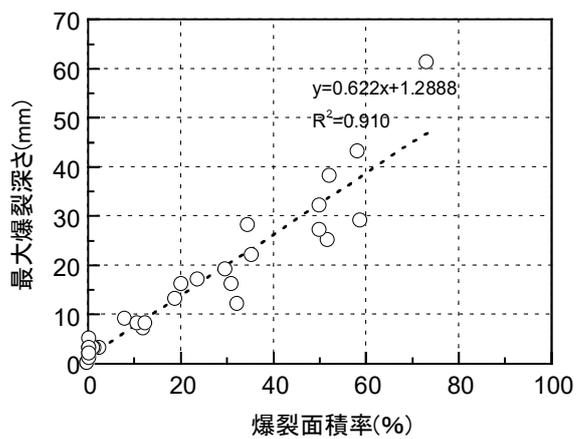


図 3-13 爆裂面積率と最大爆裂深さの関係 (PP1, PP2)

単位水量と最大爆裂深さの関係を図 3-14 に、単位ペースト容積と最大爆裂深さの関係を図 3-15 に示す。3.3 節の実験シリーズ I の結果から、スランプタイプより高流動タイプの方が、爆裂深さは大きい結果が得られており、浦野ら⁹⁾も同様の傾向について報告している。そのため、単位水量や単位ペースト量の増加に伴い、爆裂深さの増加が懸念された。単位水量が 200kg/m^3 までは、単位水量の増加に伴い、最大爆裂深さも増加傾向を示したが、 200kg/m^3 を超えると、逆に最大爆裂深さは減少傾向を示した。また、単位ペースト量が 430L/m^3 までは単位ペースト量の増加に伴い爆裂深さも増加傾向を示すが、単位ペースト量が 430L/m^3 以上の範囲では、逆に減少傾向を示した。

PP 繊維の混入率の増加に伴い、所要の流動性を確保するのに、単位水量や単位ペースト量が増加する。特に水結合材比の低下に伴い爆裂深さが増大するため、その傾向は大きくなる。しかし、PP 繊維の混入による爆裂の抑制効果が高いため、PP 繊維の混入量が多く、単位水量および単位ペースト量が大きい範囲においては、PP 繊維の混入によって単位水量や単位ペースト量が増加しても、必ずしも爆裂深さは増加せず、逆に減少傾向を示すことが判った。

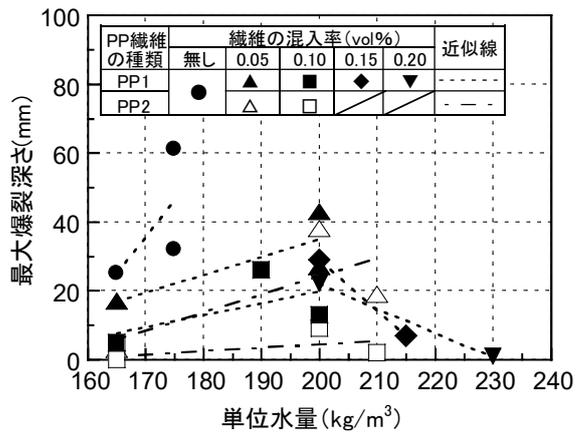


図 3-14 単位水量と最大爆裂深さの関係

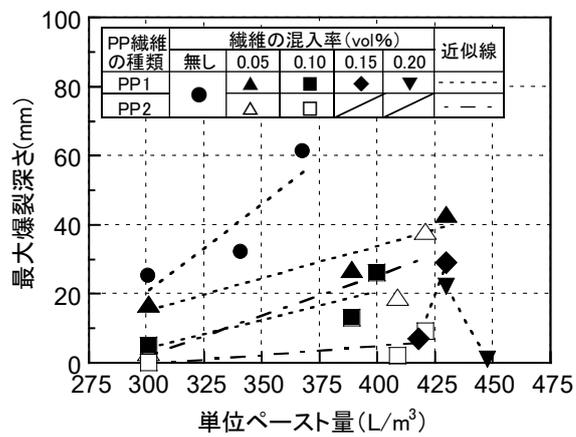


図 3-15 単位ペースト量と最大爆裂深さの関係

PP 繊維の表面積と最大爆裂深さの関係を図 3-16 に示す。若干ばらつきは認められるものの、概ね相関性が認められた。実験シリーズ I の結果から、繊維の表面積と爆裂深さの間には必ずしも相関性が認められないが、PP 繊維のアスペクト比が 410~570 の範囲においては、PP 繊維の表面積の大小で爆裂深さが評価できることを確認した。この結果は、吉田ら⁹⁾の知見と同様の傾向であった。

圧縮強度と最大爆裂深さの関係を図 3-17 に示す。また、結合材水比と最大爆裂深さの関係を図 3-18 に示す。PP 繊維の種類および混入率が同一の場合、圧縮強度や結合材水比の増加に伴い、最大爆裂深さも増加した。結合材水比と最大爆裂深さとの関係には線形関係が認められた。

最大爆裂深さを 10mm 未満、10mm 以上 20mm 未満および 20mm 以上の 3 段階に分類し、結合材水比と PP 繊維の混入率との関係で整理したグラフを図 3-19 および図 3-20 に示す。水結合材比の低下に伴い、爆裂深さは増加するが、所要の PP 繊維を混入することで、爆裂深さを低減できる。また、アスペクト比の大きい PP2 を使用した方が爆裂の抑制効果が高いことも再確認した。結合材水比と爆裂深さを 10mm 未満に抑制するために必要な PP 繊維の混入率の間には線形関係が認められた。アスペクト比の大きい繊維 17dtex×長さ 20mm および繊維 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を用いる場合、爆裂深さは結合材水比と PP 繊維の混入量によって整理することができ、爆裂の制御が可能である。水結合材比が 28.8%以上の範囲においては、繊維を最大で 0.3vol.%混入することで爆裂の抑制が可能である。強度水準に応じた爆裂の抑制に必要な PP 繊維の混入率の目安を示した。

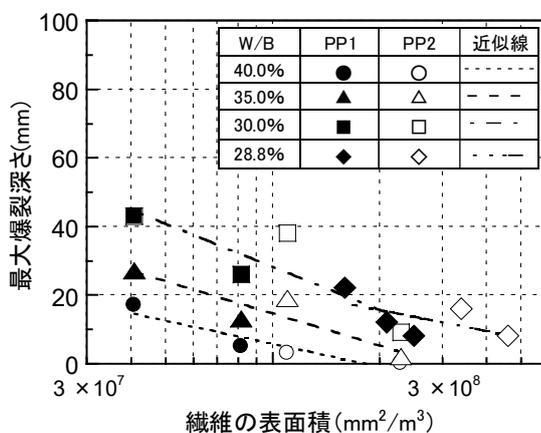


図 3-16 PP 繊維の表面積と最大爆裂深さの関係

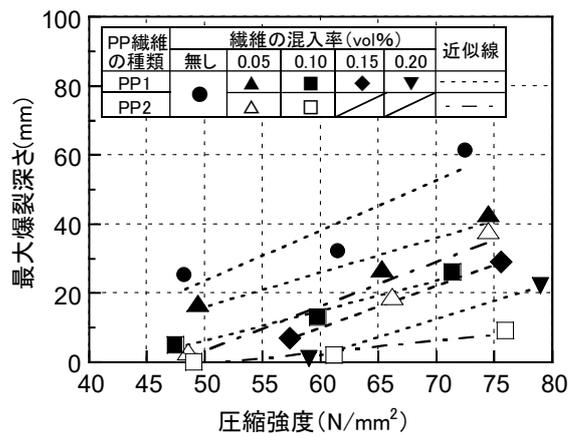


図 3-17 圧縮強度と最大爆裂深さの関係

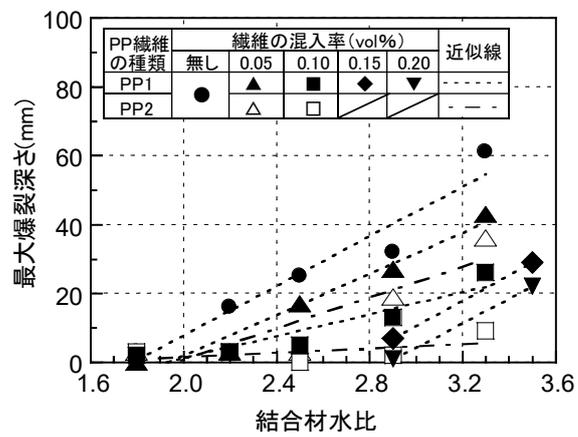


図 3-18 結合材水比と最大爆裂深さの関係

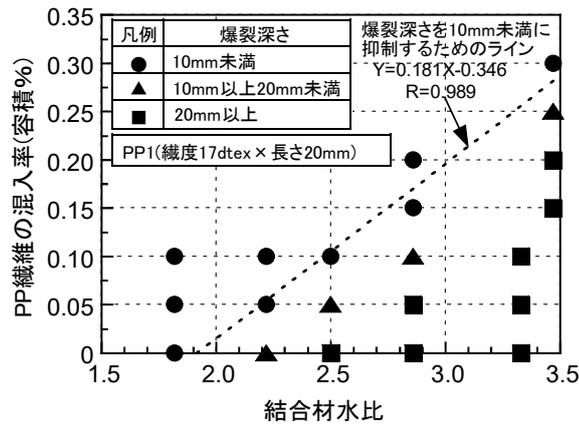


図 3-19 結合材水比と PP 繊維の混入率の関係 (PP1)

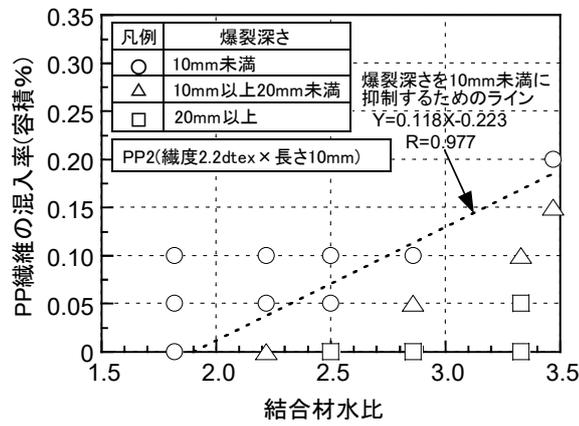


図 3-20 結合材水比と PP 繊維の混入率の関係 (PP2)

3.5 まとめ

覆工コンクリート自体に耐火性を付与することを目的として、PP 繊維の混入による耐爆裂性を確保する技術の検討を行った。覆工コンクリートを模擬した平板試験体を用いて RABT 曲線による耐火実験を行い、爆裂の抑制効果の確認を行った。また、使用材料や配合の違いが爆裂に及ぼす影響を確認し、爆裂の抑制に必要な PP 繊維の形状や混入率を定量的に示した。

その結果、以下の知見が得られた。

- (1) RABT 曲線を用いた加熱による爆裂は、加熱初期の 10 分間に発生し、断続的に試験体全面にわたって平均的に発生する。最大爆裂深さ、平均爆裂深さおよび爆裂面積率の間には相関関係が認められる。
- (2) PP 繊維のアスペクト比の増加に伴い、爆裂深さは低減する。特に、水結合材比が 28.8%以上の範囲においては、繊維度 17dtex×長さ 20mm および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm（アスペクト比が 410～570）の PP 繊維が爆裂の抑制に効果的である。
- (3) PP 繊維の爆裂の抑制効果が高く、繊維の混入により所要の流動性を確保するために単位水量および単位ペースト量が増加しても、爆裂を十分に抑制できる。
- (4) 繊維度の低下に伴い、爆裂深さが抑制されるが、繊維の長さが 2mm と短い場合、爆裂深さが大きくなり、爆裂深さは必ずしも繊維の表面積で整理はできない。アスペクト比の大きい繊維度 17dtex×長さ 20mm および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を用いる場合には、繊維の表面積と爆裂深さの間に相関関係が認められる。
- (5) 水結合材比の低下に伴い、爆裂深さは増加するが、所要の PP 繊維を混入することで、爆裂深さを低減できる。アスペクト比の大きい繊維度 17dtex×長さ 20mm および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を用いる場合、爆裂深さは結合材水比と PP 繊維の混入量によって整理することができ、爆裂の制御が可能である。水結合材比が 28.8%以上の範囲においては、繊維を最大で 0.3vol.%混入することで爆裂の抑制が可能である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2017
- 2) 土木学会：トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針（案），コンクリートライブラリー，No.143，2014
- 3) 首都高速道路株式会社：トンネル構造物設計要領（シールド工法編），第3編 耐火設計，pp.1-27，2008
- 4) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2017
- 5) 浦野知子，林成卓，土橋浩，角田浩：鋼繊維補強コンクリートの耐火性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.321-326，2004
- 6) 吉田理紗，川西貴士，平田隆祥：ポリプロピレン短繊維を混入したセグメント用コンクリートの流動性向上に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.291-296，2018

第4章 耐火コンクリートにおける配合の修正方法

4.1 はじめに

都市部に構築される道路トンネルでは、車両事故による火災に備えた対策が求められる。これまでに、PP 繊維の混入による爆裂の抑制対策について述べてきた。特に、3章の結果から、アスペクト比の大きい繊維を 0.3vol.%程度まで混入することで、爆裂を抑制できることを示した。

しかし、この PP 繊維をフレッシュコンクリートに混入すると、流動性が大きく低下することが懸念される。2章でも述べたとおり、これまでの研究により、アスペクト比の大きい繊維を混入する場合に、繊維の混入によって流動性が低下することが示されており、所要の流動性と材料分離抵抗性を確保するには、単位水量や細骨材率の増加が必要であることが判っている。しかし、耐爆裂性の確保に効果的なアスペクト比の大きい PP 繊維の混入がコンクリートの流動性や材料分離抵抗性に及ぼす影響については、十分に把握されていないのが現状である。そこで、この PP 繊維を混入する場合の、合理的な配合の修正方法が求められる。

比較的直径が大きく、アスペクト比の小さい鋼繊維を混入するコンクリートについては、土木学会より鋼繊維補強コンクリートの設計施工指針（案）（以下、SFRC 指針と呼称）が発刊されており、配合の修正方法が記載されている。SFRC 指針によると、鋼繊維の断面寸法が 0.3~0.6mm で、鋼繊維の混入率は 0.5~2vol.%が対象とされている。3章の結果より爆裂の抑制に効果的な PP 繊維の換算直径は 0.05mm 以下で、繊維の混入率は 0.3vol.%以下が対象であり、SFRC 指針の適用範囲外となる。また、SFRC 指針に記載されている鋼繊維のアスペクト比は 60 であるが、爆裂の抑制に必要な PP 繊維のアスペクト比は 410~570 である。そのため、仮に SFRC 指針に従って配合の補正を行うとすると、アスペクト比が 350~510 増加するため、単位水量を 350~510kg/m³ 増加し、細骨材率を 105~153%増加することとなり現実的ではない。したがって、SFRC 指針に記載されている配合の修正方法をそのまま準用できない。

そこで、本章では、3章で得られた知見をもとに、爆裂の抑制を目的とした直径が小さくアスペクト比の大きい PP 繊維の混入が、コンクリートの流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響について実験的に検討した。そして、PP 繊維の形状や混入率に応じて、ベースコンクリートの配合を修正する方法について検討した。

4.2 実験概要

4.2.1 実験ケース

シールドトンネルに使用するセグメントは、従来から固練りのコンクリートが使用されており^{2),3)}、テーブルバイブレータや内部振動機により締固めが行われている。しかし、セグメントの製作の省力化やオンサイトでの製造に向けて、比較的高スランプのコンクリートや高流動コンクリートの使用事例が増えている^{4)~6)}。

一方、シールドトンネルにおける二次覆工は現場打ちコンクリートが使用されることが多い。また、本線とランプとの接続部には拡幅部があり、その覆工は現場打ちコンクリートが使用される⁷⁾。さらに、山岳トンネルの覆工も現場打ちコンクリートで施工される。現場打ちの覆工コンクリートは、一般に狭隘な空間内でコンクリートの打込みおよび締固めを行うため、スランプ15~18cmのコンクリートが使用されることが多い^{8)~13)}。しかし、鉄筋が高密度に配置される場所や、天井部や狭隘部などの締固めが困難な場所への打込みについては、高流動コンクリートを使用することが多い^{14)~17)}。近年では、スランプタイプと高流動タイプの間位置する中流動コンクリートを採用する場合もある^{18),19)}。

従来から用いられている固練りコンクリートは、PP繊維の混入がフレッシュコンクリートの流動性や材料分離抵抗性に与える影響は小さいと考えられる。しかし、流動性の高いコンクリートは、流動性や材料分離抵抗性に大きな影響を与える可能性が高い。

そこで、コンクリートの種類は、スランプタイプおよび高流動タイプの2種類を対象として実験を行った。PP繊維を混入する場合の配合の修正方法を検討するために、3つのシリーズに大別して実験を実施し、繊維の混入が流動性や材料分離抵抗性及ぼす影響について確認した。本章では、流動性の指標はスランプおよびスランプフローとし、材料分離抵抗性の指標は目視確認とした。実験シリーズIでは、PP繊維を混入する場合にどの程度の流動性が低下するかを把握するために、繊維混入前のベースコンクリートの配合を同一とし、PP繊維を外割で混入した場合のコンクリートのスランプおよびスランプフローに及ぼす影響を確認した。実験シリーズIIおよびIIIでは、PP繊維を混入した場合に、目標とするスランプおよびスランプフローを確保するために必要な単位水量と、最適な細骨材率もしくは単位粗骨材絶対容積について検討した。実験の手順は、最初に目標とするスランプおよびスランプフローが確保できるまで単位水量を増加し、PP繊維の混入率と単位水量の増加量の関係を確認した。次に、その確認した単位水量を固定し、細骨材率もしくは単位粗骨材絶対容積を変化させて、コンクリートの状態を確認した。

4.2.2 使用材料，配合および練混ぜ方法

覆工コンクリートへの実施工を想定して，スランプタイプの目標スランプは15cmとし，高流動タイプの目標スランプフローは60cmとした。空気量の目標値は，スランプタイプは4.5%とし，高流動タイプは2.0%とした。PP繊維は外割で添加し，混入率は容積比で0.1，0.2および0.3%の3水準で実験を行った。

実験に使用した材料を表4-1に示す。PP繊維には，3章の結果から爆裂の抑制効果の高い結果が得られた直径が小さくかつアスペクト比の大きい2種類の繊維を使用した。使用したPP繊維の外観を写真4-1に示す。結合材には，環境配慮と耐久性向上の観点から，普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を50%ずつ混合して使用した。都市部の大深度地下に構築されるシールドトンネルでは，60～80N/mm²程度の高強度コンクリートが求められるため，実績から水結合材比は35%とし，水結合材比一定のもとで配合検討を行った。

単位水量は，目標とする流動性や材料分離抵抗性が確保できる範囲内でできるだけ低減することとした。また，単位水量を補正する際には，水結合材比は一定とした。混和剤の添加率は，スランプタイプは標準添加率とし，単位結合材量の1%で一定とした。高流動タイプは，混和剤の過剰な添加による材料分離やコンクリートの凝結遅延が認められない範囲内で増加し，単位水量をできるだけ低減した。両タイプとも高性能AE減水剤を用いた。単位細骨材量と単位粗骨材量との割合は，スランプタイプは細骨材率で設定し，ベースコンクリートの細骨材率は46%とした。高流動タイプは単位粗骨材絶対容積で設定し，ベースコンクリートの単位粗骨材絶対容積を330L/m³とした。

コンクリートの練混ぜは，二軸強制練りミキサを用いて行い，ベースコンクリートを2分間練り混ぜた後，PP繊維を混入し，さらに1分間練り混ぜた。試験項目はスランプおよびスランプフローとし，それぞれ，JIS A 1101 および JIS A 1150 に準拠して試験を行った。

表 4-1 使用材料

種類	記号	各材料の種類および物性
練混ぜ水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm^3
混和材	BS	高炉スラグ微粉末, 密度 2.89g/cm^3
細骨材	S	砂, 密度 $2.61\sim 2.62\text{g/cm}^3$, 粗粒率 $2.60\sim 2.68$
粗骨材	G	碎石, 密度 2.65g/cm^3 , 粗粒率 $6.58\sim 6.60$
減水剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
短繊維	PP1	PP繊維, 密度 0.91g/cm^3 , 織度 17dtex ×長さ 20mm (アスペクト比 410)
	PP2	PP繊維, 密度 0.91g/cm^3 , 織度 2.2dtex ×長さ 10mm (アスペクト比 570)

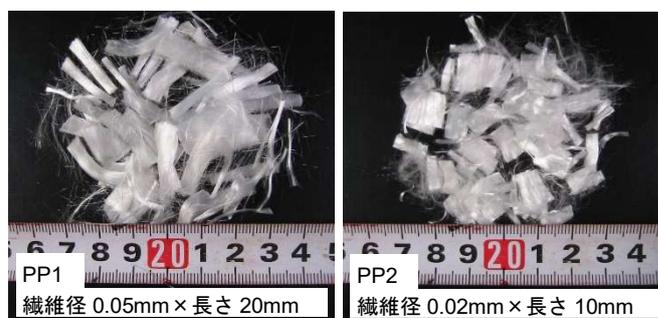


写真 4-1 使用した PP 繊維

4.3 PP 繊維の混入が流動性の低下に及ぼす影響（実験シリーズ I）

実験シリーズ I では、ベースコンクリートに PP 繊維を混入し、コンクリートのスランプおよびスランプフローに及ぼす影響を確認した。その試験結果を図 4-1～図 4-3 に示す。高流動タイプについては、スランプフローだけでなくスランプも測定した。

スランプタイプおよび高流動タイプともに、PP 繊維の混入率の増加に伴い、流動性が低下した。これは、小林らの鋼繊維の知見²⁰⁾と同様となった。繊維の表面にセメントペーストが拘束され、流動性に寄与するセメントペースト量が低減することと、繊維の骨材による拘束が原因と考えられる。アスペクト比が大きい PP2 の方が PP1 よりも流動性の低下量が大きい結果となった。所要の流動性を確保するには、ベースコンクリートの流動性の増加が必要であることが判った。

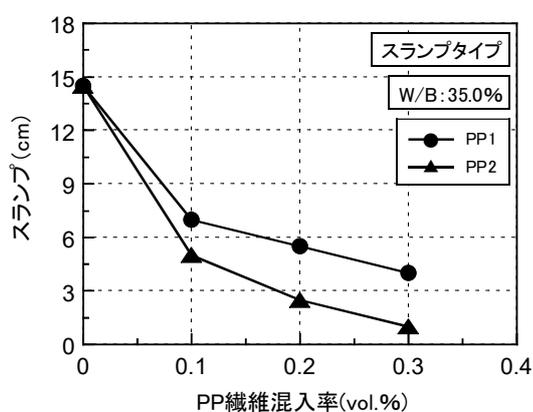


図 4-1 PP 繊維の増加に伴うスランプの低下

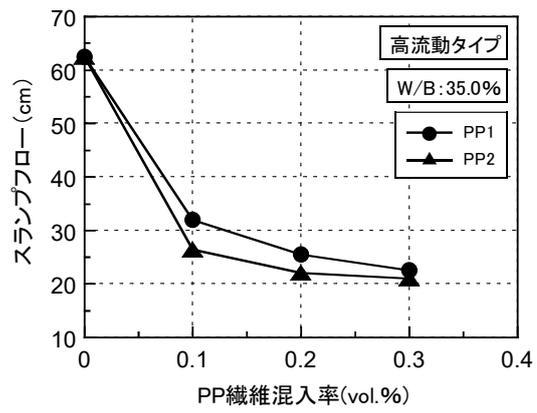


図 4-2 PP 繊維の増加に伴うスランプフローの低下

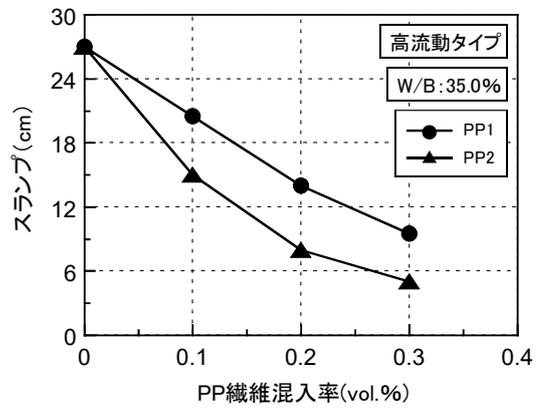


図 4-3 PP 繊維の増加に伴うスランプの低下

4.4 スランプ管理のコンクリートの配合の修正方法に関する検討（実験シリーズⅡ）

4.4.1 実験概要

実験シリーズⅡでは、スランプタイプについて、PP 繊維を混入した場合に、目標とするスランプを確保するために必要な単位水量と、最適な細骨材率について検討した。実験水準として、PP 繊維の種類、PP 繊維の混入率および細骨材率を変化させた。スランプの目標値は 15cm とし、空気量の目標値は 4.5% とした。3 章の結果から、爆裂の抑制には 0.1~0.3vol.% の PP 繊維を混入することとなる。そのため、PP 繊維の混入率は 0, 0.1, 0.2 および 0.3vol.% の 4 水準とし、PP 繊維は外割で添加した。さらに、都市部の大深度地下に構築される道路トンネルでは、高強度コンクリートが求められるため、水結合材比は 35% とした。細骨材率は、38, 42, 46, 50, 54 および 58% の 6 水準とした。最初に、PP 繊維を混入しないベースコンクリートの細骨材率を実績から 46% と設定し、PP 繊維の混入率に応じて、スランプ 15cm を確保するために必要な単位水量を決定した。高性能 AE 減水剤の混入率は結合材に対して 1% と一定とし、PP 繊維の種類や混入率ごとに決定した単位水量を一定として細骨材率を変化させ、コンクリートのフレッシュ性状の確認を行った。細骨材率 46% の場合の配合例の一覧を表 4-2 に示す。

コンクリートの練混ぜは、4.3 章と同様に二軸強制練りミキサを用いて行い、ベースコンクリートを 2 分間練り混ぜた後、PP 繊維を混入して、さらに 1 分間練り混ぜた。試験項目は JIS A 1101 のスランプ試験および DIN 1048 のスプレッド試験を行った。流動性は、スランプ試験の結果から評価した。材料分離抵抗性は、スランプ試験時のコンクリートの状態およびスプレッド試験の結果から総合的に評価した。スプレッド試験は、高さ 15cm のスランプコーンに試料を詰めて、コーンを引抜き、コンクリートの拡がりであるスプレッド値を測定した。測定は、コーンの引抜き直後と、スランプ板の落下回数 5 および 15 回の段階でそれぞれ実施した。

表 4-2 配合例の一覧

PP繊維の種類	PP繊維の混入率 (vol.%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					PP (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
				W	C	BS	S	G		
無し	0	35.0	46.0	155	221	221	784	935	—	4.42
PP1	0.1	35.0	46.0	165	236	236	762	906	0.9	4.72
	0.2	35.0	46.0	170	243	243	749	893	1.8	4.86
	0.3	35.0	46.0	180	257	257	726	865	2.7	5.14
PP2	0.1	35.0	46.0	170	243	243	749	893	0.9	4.86
	0.2	35.0	46.0	180	257	257	726	865	1.8	5.14
	0.3	35.0	46.0	195	279	279	690	824	2.7	5.58

4.4.2 実験結果および考察

PP 繊維の混入率と、目標スランプ 15cm を確保するために必要な単位水量の関係を図 4-4 に示す。PP 繊維の混入率の増加に伴い、スランプ 15cm を確保するために必要な単位水量は増加した。また、アスペクト比の大きい PP2 の方が、PP1 に比べて単位水量が増加した。スランプ試験結果の例を表 4-3 に示す。また、細骨材率とスランプの関係を図 4-5 および図 4-6 に示す。

細骨材率の増加に伴い、スランプが低下する傾向が認められた。一方、細骨材率の減少に伴い、粗骨材が目立って表面が荒々しい状態となり、一部でスランプの崩れや割れが認められた。また、PP 繊維の混入率の増加に伴い、スランプの低下量が減少した。細骨材率が 46% より小さい範囲では PP 繊維の混入率の増加に伴いスランプが小さくなり、46% より大きい範囲では PP 繊維の混入率の増加に伴いスランプの低下量が減少した。これは、PP 繊維の混入率の増加に伴い、単位水量が増加し、コンクリートの流動に必要な単位ペースト量が増大した。そのため、骨材のかみ合いが低減され、スランプに及ぼす影響が小さくなったと考える。PP1 と PP2 は同様の傾向を示した。

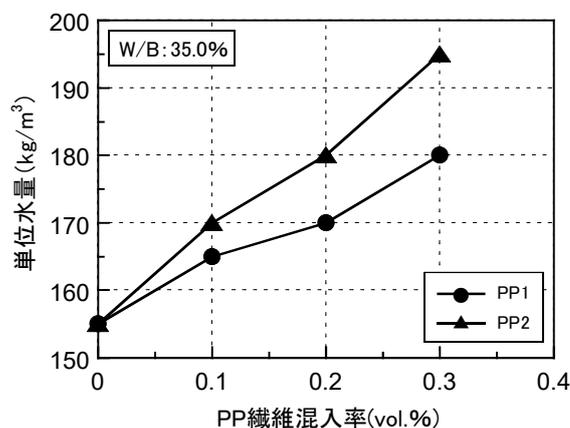


図 4-4 PP 繊維の混入率と流動性の確保に必要な単位水量の関係

表 4-3 スランプ試験結果の例

PP繊維の 種類および 混入率	細骨材率 (%)				
	38	42	46	50	54
無し					
PP2 (0.1vol.%)					
PP2 (0.3vol.%)					

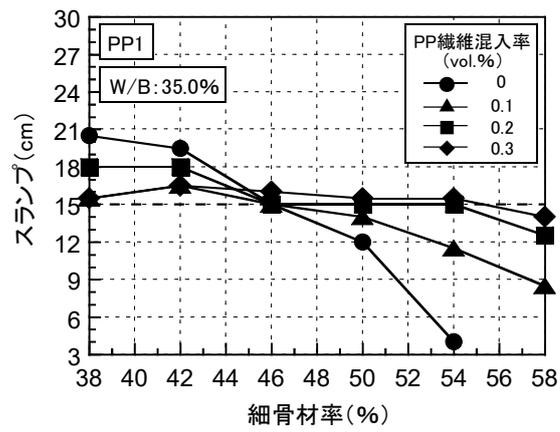


図 4-5 細骨材率とスランプの関係 (PP1)

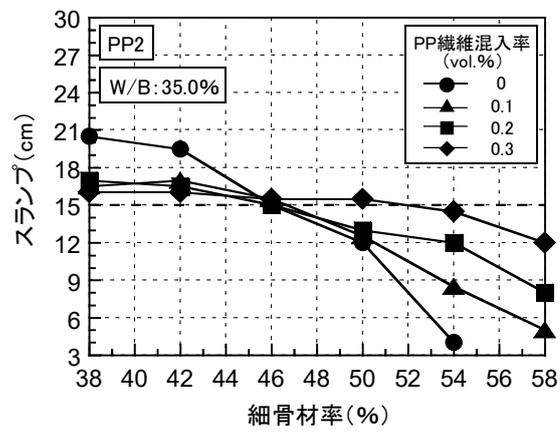


図 4-6 細骨材率とスランプの関係 (PP2)

スプレッド試験結果の例を表 4-4 に示す。また、細骨材率とスプレッド値の関係を図 4-7 および図 4-8 に示す。PP 繊維を混入していないベース配合は細骨材率の増加とともにスプレッド値が低下した。しかし、細骨材率の増加によるスプレッド値の低下量は、PP 繊維の混入率の増加に伴い低下する傾向が認められ、スランブ試験と同様の結果となった。特に、PP 繊維を 0.3vol.%混入した配合については、細骨材率 58%の配合においても顕著なスプレッド値の低下は認められなかった。スランブ試験の結果と同様に、PP 繊維の混入率の増加に伴い、コンクリートの流動に必要な単位ペースト量が増大したため、骨材のかみ合わせによる影響が小さくなったことを示しているものと考えられる。

規準類によると、材料分離抵抗性に関して、細骨材率あるいは単位粗骨材かさ容積を調整し、適切な単位細骨材量と単位粗骨材量を設定する必要があるが、具体的な設定方法は記載されていない^{21),22)}。土木学会より発刊されている施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（以下、配合設計指針と呼称）には、材料が分離傾向にある場合、スランブ試験後の試料の上面にフラット面がなく、あばた、割れ、崩れが認められるなど外観形状より判断が可能である旨記載されている²³⁾。また、石井らも、試験後の試料に衝撃を与えるタンピング試験で、試料上部の円形が保持できているかを確認することで材料分離抵抗性を評価している²⁴⁾。そこで、本実験では、スランブ試験およびスプレッド試験の試料の状態から以下の 3 つの指標で材料分離抵抗性を評価することとした。

- a) スランブの形状と粗骨材の状態を観察する。粗骨材が目立って表面が荒々しく、表面にあれ、崩れ、割れなどが認められる場合は材料分離を生じているとし、荒々しさが少なく、十分にモルタルが満たされている場合を良好な状態と判断した。
- b) スランブ試験後の試料の上面に円形が保たれている場合を良好な状態とし、円形が保たれずフラット面が認められない場合に材料分離が生じているものと判断した。
- c) スプレッド試験の落下回数が 5 回の段階で、上部の円形が保たれておりフラットな面が認められる場合を良好な状態とし、円形が保たれておらずフラットな面が認められない場合に材料分離が生じているものと判断した。

3 つの指標による評価結果を表 4-5 に示す。3 つの評価手法すべてを満足する配合を良好な材料分離抵抗性を有する配合と判断した。PP 繊維を混入しない配合と、PP1 を 0.1 および 0.2vol.%混入した配合は細骨材率 46%以上、PP1 を 0.3vol.%混入した配合および PP2 を混入した配合は細骨材率 50%以上で良好な材料分離抵抗性を有することを確認した。

表 4-4 スプレッド試験結果の例

細骨材率	38%			54%		
落下回数	0回	5回	15回	0回	5回	15回
PP繊維無し						
PP2 0.1vol.%						
PP2 0.3vol.%						

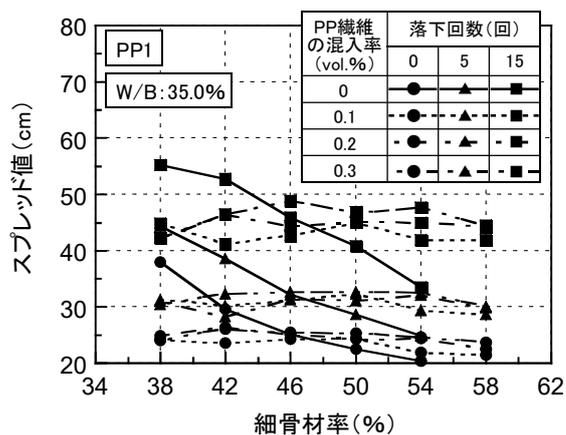


図 4-7 細骨材率とスプレッド値の関係

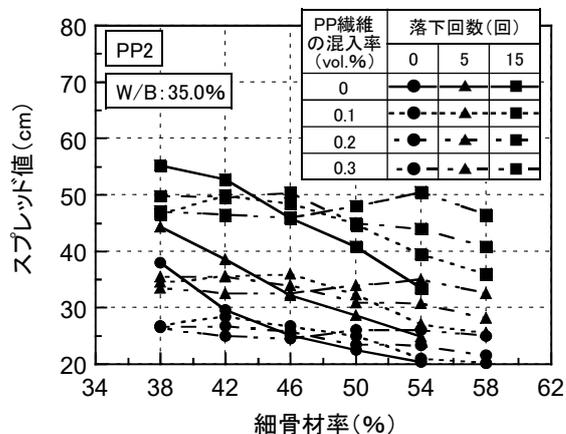


図 4-8 細骨材率とスプレッド値の関係

表 4-5 材料分離抵抗性の評価結果

PP繊維の種類	PP繊維の混入率 (vol.%)	細骨材率(%)																	
		38			42			46			50			54			58		
		(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
無し	0	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PP1	0.1	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.2	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.3	×	○	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PP2	0.1	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.2	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.3	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※ 3つの指標すべてを満足する配合

- (a) スラブ試験結果 「○」荒々しさが少なく、モルタルが満たされている。
「×」粗骨材が荒々しく、表面にあれ、崩れ、割れなどが認められる。
- (b) スラブ試験結果 「○」上部の円形が保たれており、フラットな面が認められる。
「×」上部の円形が保たれておらず、フラットな面がない。
- (c) スプレッド試験結果(5回落下後) 「○」上部の円形が保たれており、フラットな面が認められる。
「×」上部の円形が保たれておらず、フラットな面がない。

4.4.3 最適な細骨材率および単位粗骨材絶対容積の評価

細骨材率の増加に伴いスランプが低下することが、図 4-5 および図 4-6 の結果より確認できた。そのため、所要のスランプを確保するには、単位水量を増加する必要がある。また、流動性と材料分離抵抗性の両者を満足する最適な細骨材率は、材料分離抵抗性が得られる範囲でできるだけ小さく設定することが望ましく、規準類や配合設計指針にもその旨が記載されている^{1),2),7)}。そのため、最適な細骨材率は、PP1 を 0.2vol.%以下の範囲で混入する場合は 46%、PP2 を混入する場合は 50%であると考えられる。

実験では、配合設計上、細骨材率の水準を変えて実験を行ったが、材料分離抵抗性の評価については、単位粗骨材絶対容積で再整理した。PP 繊維の混入率と材料分離抵抗性を確保できる最適な単位粗骨材絶対容積の関係を図 4-9 に示す。PP 繊維の混入率の増大に伴い、単位粗骨材絶対容積を低減することで、材料分離抵抗性を確保できることが明らかとなった。

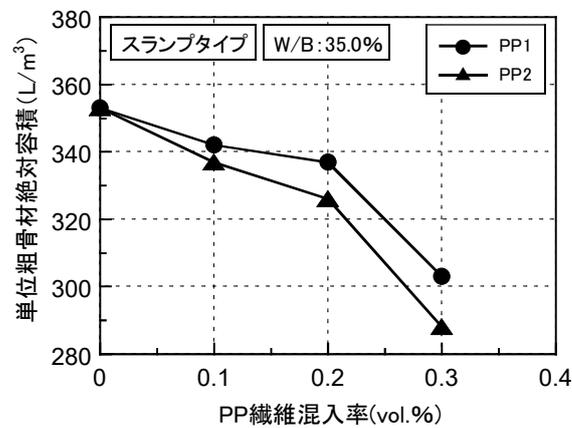


図 4-9 PP 繊維の混入率と単位粗骨材絶対容積の関係

4.5 高流動コンクリートの配合の修正方法に関する検討（実験シリーズⅢ）

4.5.1 実験概要

実験シリーズⅢでは、高流動タイプについて、PP 繊維を混入した場合に、目標とするスランプフローを確保するために必要な単位水量と、最適な単位粗骨材絶対容積について検討した。実験水準として、スランプタイプと同様に PP 繊維の種類および PP 繊維の混入率を変化させた。高流動タイプの粗骨材量は指針⁴⁾によると、充填性のランクや間隙通過性の評価指標として単位粗骨材絶対容積で管理する旨が記載されている。一方、スランプタイプの結果から、PP 繊維の混入率の増加やアスペクト比の大きい PP 繊維を使用することで、単位粗骨材絶対容積を低減する必要があることが判った。そこで、高流動タイプについても、同様の傾向があると考え、単位粗骨材絶対容積を水準として実験を行った。

スランプフローの目標値は 60cm とし、空気量の目標値は 2.0% とした。スランプタイプと同様に、水結合材比は 35% とし、PP 繊維の混入率は 0, 0.1, 0.2 および 0.3vol.% の 4 水準とした。単位水量をできるだけ低減するために、混和剤は過剰な添加による分離や凝結遅延が認められない範囲内で増加した。一般的な高流動タイプの配合より、PP 繊維を混入しないベースコンクリートの単位粗骨材絶対容積を 330L/m³ とし、単位粗骨材絶対溶液を 20L/m³ ずつ増減させ、材料分離の状況を確認した。ベースコンクリートの配合を表 4-6 に示す。

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサを用いて行い、ベースコンクリートを 2 分間練り混ぜた後、PP 繊維を混入して、さらに 1 分間練り混ぜた。試験項目は JIS A 1150 のスランプフロー試験を行い、流動性および材料分離抵抗性について確認した。

表 4-6 ベースコンクリートの配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (kg/m ³)
		W	C	BS	S	G	
35.0	48.4	175	250	250	811	874	5.50

4.5.2 実験結果および考察

PP 繊維の混入率と、目標スランプフロー60cm を確保するために必要な単位水量の関係を図 4-10 に示す。スランプタイプと同様に、PP 繊維の混入率の増加に伴い、必要な単位水量が増加した。アスペクト比の大きい PP2 の方が、PP1 に比べて単位水量をより増加する必要があることが判った。また、単位水量と混和剤の添加率の関係を図 4-11 に示す。PP 繊維の種類の違いによらず、単位水量と混和剤の添加率の間に相関関係が認められ、混和剤の添加率を増加すると単位水量を低減できることが判った。

単位粗骨材絶対容積とスランプフローの関係を図 4-12 および図 4-13 に示す。高流動タイプは、スランプタイプと同様に、単位粗骨材絶対容積を低減するほど、スランプフローが低下した。一方、いずれのケースについても、単位粗骨材絶対容積を増加していくと、高性能 AE 減水剤の添加量を増加しても目標とするスランプフローは得られず、逆にセメントペーストの分離が認められた。図中の白抜きのデータは、分離が認められたケースを示す。良好な状態と分離した状態のスランプフローの比較例を写真 4-2 に示す。PP 繊維の混入率の増加に伴い、単位粗骨材絶対容積を低減する必要があることが確認できた。また、アスペクト比の大きい PP2 の方が、PP1 と比べて単位粗骨材絶対容積をより低減する必要がある。高流動タイプは、一般に耐久性の観点から材料分離抵抗性が得られる範囲でできるだけ粗骨材量を増加させる方が良く、セメントペーストが分離することなく、目標とする流動性が確保できる最大の単位粗骨材絶対容積を決定できることが明らかとなった。

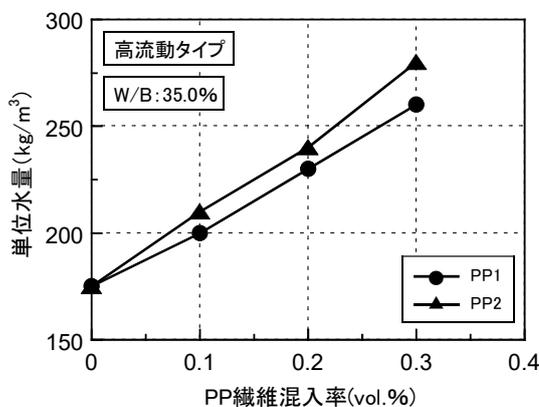


図 4-10 PP 繊維の混入率と単位水量の関係

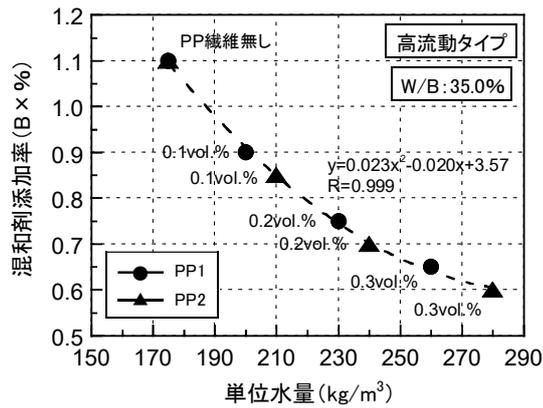


図 4-11 単位水量と混和剤添加率の関係

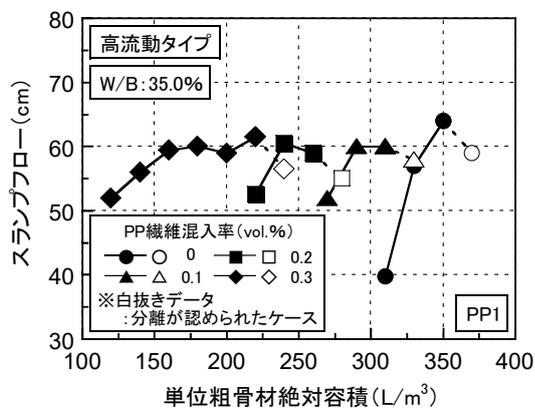


図 4-12 単位粗骨材絶対容積とスランプフローの関係

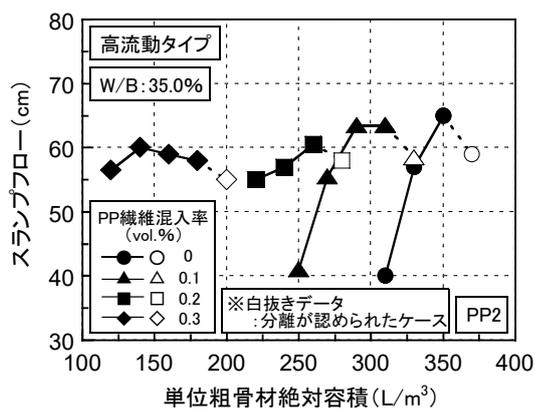


図 4-13 単位粗骨材絶対容積とスランプフローの関係

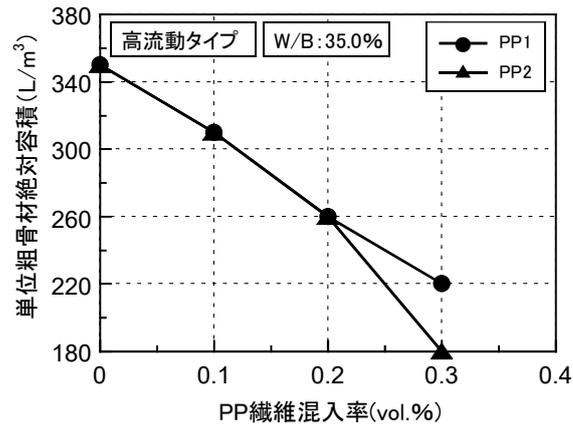


図 4-14 PP 繊維の混入率と単位粗骨材絶対容積の関係



写真 4-2 スランプフローの状態の比較例

4.6 PP 繊維を混入する場合の配合の修正方法の提案

4.5 節および 4.6 節の結果より、PP 繊維の混入率の増加に伴い、目標とする配合条件を満足するには、単位水量を増加し、単位粗骨材絶対容積を低減する必要があることが判った。そこで、SFRC 指針の中に記載されている配合の設計方法を参考に、ベースコンクリートの配合の修正方法について検討した。

スランプタイプについては図 4-4、高流動タイプについては図 4-10 をもとに、PP 繊維の混入率の増加に伴う単位水量の増加量を一次式で近似したグラフを図 4-15 に示す。スランプタイプは、PP 繊維の混入率が 0.1vol%増加するのに比例して、PP1 の単位水量の補正量は 8.2kg/m^3 となり、PP2 は 13.2kg/m^3 であった。高流動タイプは、PP 繊維の混入率が 0.1vol%増加するのに比例して、PP1 の単位水量の補正量は 27.9kg/m^3 となり、PP2 は 34.3kg/m^3 であった。

スランプタイプについては図 4-9、高流動タイプについては図 4-14 をもとに、PP 繊維の混入率の増加に伴う単位粗骨材絶対容積の低減量を一次式で近似したグラフを図 4-16 に示す。スランプタイプは、PP 繊維の混入率が 0.1vol.%増加するのに比例して、PP1 の単位粗骨材絶対容積の補正量は 13.8L/m^3 の低減となり、PP2 は 18.8L/m^3 の低減となった。高流動タイプは、PP 繊維の混入率が 0.1vol.%増加するのに比例して、PP1 の単位粗骨材絶対容積の補正量は 43.6L/m^3 の低減となり、PP2 は 52.1L/m^3 の低減となった。

今回の実験結果から、爆裂の抑制を目的とした直径の小さい PP 繊維を混入する場合のベースコンクリートの配合の修正方法を表 4-7 にまとめた。この表には、PP1 を使用する場合の補正量を標準として記載した。PP 繊維の混入に伴い、コンクリートの単位水量の増加が必要である。しかし、耐久性、収縮、ひび割れなどの観点からできるだけ単位水量の低減が望ましい。そのため、混和剤の添加率を増加したり、単位粉体量の増加により流動性を確保するなどの配慮が求められる。また、過剰な PP 繊維の混入は、単位水量の増加を招くため、3 章の結果をもとに適切な混入率とすることが望ましい。

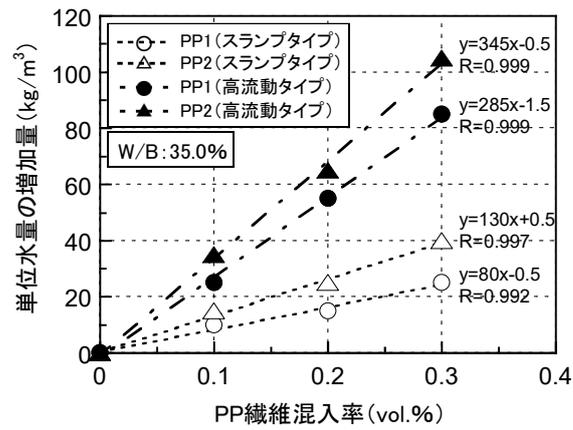


図 4-15 PP 繊維の混入率と単位水量の増加量の関係

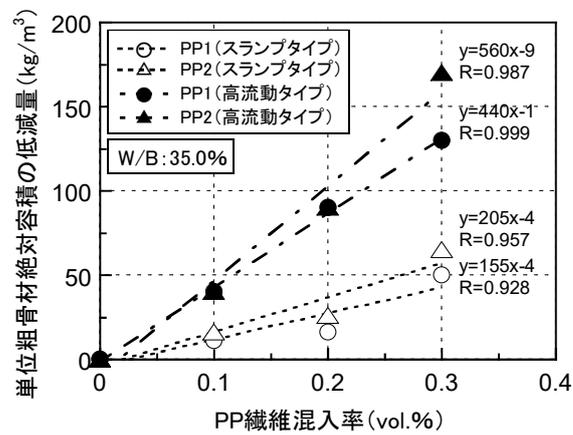


図 4-16 PP 繊維の混入率と単位粗骨材絶対容積の低減量の関係

表 4-7 PP 繊維の混入による配合の修正方法の提案

条件の変化		PP繊維の混入率を 0.1vol.%増加する 場合の各補正量	PP繊維のアスペクト比を 10増加する場合の 各補正量の割増し量
単位水量 (kg/m ³)	スランプタイプ	+8.2	0.038倍
	高流動タイプ	+27.9	0.014倍
単位粗骨材絶対容積 (L/m ³)	スランプタイプ	-13.8	0.023倍
	高流動タイプ	-43.6	0.013倍

(基本条件)

- 1) PP繊維の形状寸法:アスペクト比410(繊維度17dtex×長さ20mm)
アスペクト比の適用範囲(上限):570(繊維度2.2dtex×長さ10mm)
- 2) PP繊維の混入率:0.3vol.%以下
- 3) 水セメント比:35.0%
- 4) スランプタイプ:目標スランプ15cm
高流動タイプ:目標スランプフロー60cm

4.7 まとめ

耐爆裂性の確保に最適な直径が小さく、アスペクト比の大きいPP繊維を用いる場合、コンクリートの流動性や材料分離抵抗性が低下するため、単位水量や単位粗骨材絶対容積の調整が必要である。既往の知見として、比較的アスペクト比の大きい鋼繊維を用いる場合には、配合の修正方法の目安が記されているが、直径が小さく、アスペクト比の大きいPP繊維を用いる場合にはこの修正方法をそのまま準用することはできない。

そこで、繊維度 17dtex×長さ 20mm でアスペクト比 410 と、繊維度 2.2dtex×長さ 10mm でアスペクト比 570 の2種類のPP繊維を 0.3vol.%まで混入した耐火コンクリートについて試し練りを行い、PP繊維の形状および混入率が流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、PP繊維を混入する場合に、所要の流動性および材料分離抵抗性を確保するための、ベースコンクリートの配合の修正方法を提案した。

本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) PP繊維の混入率の増加に伴い、流動性が低下する。PP繊維の混入率が同一であれば、PP繊維のアスペクト比が大きい方が流動性の低下量も大きい。
- (2) 所要の流動性を確保するには、PP繊維の混入率の増加に比例して、単位水量の増加が必要となる。その増加量は、繊維のアスペクト比が大きいほど増加する。
- (3) 所要の流動性を保持しながら、材料分離抵抗性を確保するには、PP繊維の混入率の増加に比例して、単位粗骨材絶対容積の低減が必要である。その低減量は、繊維のアスペクト比が大きいほど増加する。
- (4) PP繊維の混入に伴う単位水量の増加量や単位粗骨材絶対容積の低減量は、スランプタイプよりも高流動タイプの方が大きい。

参考文献

- 1) 土木学会:鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案),コンクリートライブラリー第50号, 1983
- 2) 帝都高速度交通営団:土木工事示方書集,第4編 鉄筋コンクリートセグメント製作示方書, 1998
- 3) 新井崇裕,平石剛紀,宮本圭一,横井伸昭:剥落防止機能を有する有機系短繊維補強コンクリートの耐火性能,コンクリート工学年次論文集,Vol.29, No.1, pp.381-386, 2007
- 4) 今石尚,大友健,青木智幸,伊藤一教:ボスボラス海峡横断鉄道建設プロジェクト ヨーロッパとアジアを結ぶ巨大プロジェクト,大成建設技術センター報,Vol.46, pp.1-8, 2013
- 5) 牛島栄,谷口秀明,塩原卓男,吉富太彦:コンクリートセグメントへの高流動コンクリートの適用,コンクリート工学年次論文集,Vol.17, No.1, pp.243-248, 1995
- 6) 土橋浩,松原健太,屋代勉,小林一博:鋼繊維補強高流動コンクリート(SFRC)セグメントの現場適用,コンクリート工学,Vol.44, No.11, pp.45-50, 2006
- 7) 津野和宏,落合栄司,川田成彦,藤井剛,高浜達矢:民地下に道路トンネル分合流部を構築するための技術的対策,トンネル工学報告集,Vol.22, pp.447-454, 2012
- 8) 浦沢義彦,大塚幸男,藤井網男,木田博光:場所打ち覆工コンクリートの施工品質について,トンネル工学研究発表会論文・報告集,Vol.4, pp.287-292, 1994
- 9) 土木学会:トンネルコンクリート施工指針(案),コンクリートライブラリー第102号, 2000
- 10) 東・中・西日本高速道路株式会社:コンクリート施工管理要領, 2017
- 11) 平川泰之,竹下永造,永久和正,橋爪正博:膨脹材を使用したトンネル覆工コンクリートのケミカルプレストレス量の評価:コンクリート工学年次論文集,Vol.32, No.1, pp.503-508, 2010
- 12) 白根勇二,賀川昌純,菊地晃徳,小松敏彦:表面平滑型シート防水工によるトンネル覆工コンクリートのひび割れ抑制効果の検証:コンクリート工学年次論文集,Vol.34, No.1, pp.1372-1377, 2012
- 13) 東邦和,石井敏之,三澤孝史,齊藤賢治:保湿・保温養生マットを用いた覆工コンクリートの養生効果の研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.36, No.1, pp.430-435, 2014
- 14) 宇野洋志城,市野大輔,吉永正雄,弘中義昭:過密配筋されたトンネル覆工への高流動コンクリート施工,コンクリート工学年次論文集,Vol.26, No.1, pp.1401-1406, 2004
- 15) 吉田克弥,佐藤誠,福元准士:山岳トンネル二次覆工への高流動コンクリートの適用,コンクリート工学年次論文集,Vol.23, No.2, pp.1039-1044, 2001
- 16) 井出一雄,樋口正典,竹内光:過密配筋されたシールド二次覆工における高流動コンクリートの適用,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.15, No.1, pp.195-200, 1993
- 17) 伊藤祐二,山県達弥,秋葉忠彦,横須賀誠一:シールド二次覆工への高流動コンクリートの適用,コンクリート工学年次論文報告集,Vo.15, No.1, pp.201-204, 1993
- 18) 東・中・西日本高速道路株式会社:トンネル施工管理要領, 2017

- 19) 桜井邦昭, 近松竜一, 谷口信博, 秋好賢治: 増粘剤を用いた中流動コンクリートのトンネル覆工への適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1301-1306, 2010
- 20) 小林一輔, 岡村雄樹: 所要のコンシステンシーを得るための鋼繊維補強コンクリートの配合設計方法, 土木学会論文集, Vol.296, pp.111-119, 1980.4
- 21) 土木学会: 高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012年版], コンクリートライブラリー第136号, 2012
- 22) 日本建築学会: 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説, 1997
- 23) 土木学会: 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針 [2016年版], コンクリートライブラリー第145号, 2017
- 24) 石井佑大, 宇治公隆, 上野敦: タンピング試験におけるワーカビリティの簡易評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008

第5章 火害を受けた覆工コンクリートの補修技術

5.1 はじめに

シールドトンネル内で車両火災が発生した場合、トンネル内は急速に高温下に晒される。覆工コンクリートに耐火板や耐火吹付けなどの耐火被覆を施す場合には、覆工コンクリートの健全性は保たれるので、火災後にその耐火被覆のみを交換すればよい。しかし、覆工コンクリート自体に耐火性を付与する場合には、加熱により覆工コンクリートが強度低下を招くため、火災後には劣化した範囲の調査を行い、劣化部を除去して、次の火災に備えて、耐火性を有する材料により補修を行う必要がある。

3章では、アスペクト比の大きい綿状のPP繊維を混入することで耐爆裂性を確保できる耐火コンクリートを提案した。これは、新しく構築するシールドトンネルの覆工コンクリートを対象としている。しかし、劣化したコンクリートの補修を行う場合、曲げ強度や引張強度、耐久性および付着性を確保する観点から、一般にポリマーセメントモルタル（以下、PCMと呼称）にて補修が行われる¹⁾。そのため、火害を受けた後の補修においては、耐爆裂性を有するPCMを用いた補修が必要となる。また、補修が必要な深さを把握するためには、火害によるコンクリートの劣化範囲とその程度を事前に推定する必要がある。そのためには、手間がかからず、短期間のうちに効率よく簡易に劣化範囲を推定できる技術が望まれる。さらに、2章でも記述したが、PCMは耐爆裂性に劣るとの指摘が多い。そこで、本章では、劣化範囲の簡易な調査方法、劣化部の除去方法およびPCMを用いた耐火性を有する補修方法について検討し、火害を受けた覆工コンクリートにおける補修技術の提案を行った。

5.2 火害による劣化部の簡易な調査技術の提案

火害を受けたコンクリートの劣化の程度を測定する方法として多数の方法が提案されている^{2),3)}。2章にて、既往の測定方法について述べたが、深さ方向の劣化の分布を測定しようとする、課題も多い。火害を受けたコンクリート部材の劣化範囲を簡易に推定できる技術が望まれている。

そこで、小型のエコーチップ硬さ試験機を用いて反発硬度を測定し、残存圧縮強度の分布を推定する方法を考案した。大深度地下のシールドトンネルにおいては、高強度コンクリートでかつRABT曲線による加熱履歴を受けた場合の劣化深さの評価方法が求められる。そのため、RABT曲線による高温履歴を与えた高強度コンクリート試験体から採取したコアを用いて、深さごとの反発硬度の測定を行い、測定方法の妥当性を検証した。本節では、エコーチップ硬さ試験機を用いた簡易な評価手法の妥当性を検証した結果について報告する。

5.2.1 エコーチップ硬さ試験機による調査方法の概要

火害による劣化度合いの深さ方向の分布について、簡易な推定方法として、採取したコア試験体を用いて、エコーチップ硬さ試験機により反発硬度を測定し、深さ方向の強度分布を推定する方法を考案した。エコーチップ硬さ試験機は、1975年にスイスで開発された硬さ試験機で、もともとは、金属材料の品質の非破壊検査用に使用されてきた⁴⁾。金属材料以外にも、プラスチック、ゴム、紙などの反発強さや、梨の収穫時期と食用時期を判定するための硬さの測定に用いられており、岩質材料の圧縮強度や弾性係数などの力学的特性に関する研究がなされている^{5),6)}。コンクリート分野においては、研究事例は少ないが、硫酸溶液や塩害環境下で暴露したコンクリートの表面硬度を測定した事例が報告されている^{7),8)}。

エコーチップ硬さ試験機の概要を図5-1に示す⁹⁾。テストチップを有するインパクトボディが、一定のバネの力でコンクリートの表面を打撃する速度と跳ね返る速度の比率からコンクリートの硬さを推定する。反発硬度は、次の式(1)で計算される⁴⁾。1996年にASTM A956¹⁰⁾、2007年にDIN 50156¹¹⁾として試験方法が登録されている。この試験機は、操作が簡易でコンパクトであり、打撃エネルギーが11N・mmと小さくリバウンドハンマーの200分の1程度であるため、コンクリートをほとんど損傷することなく、測定することが可能である^{6),12)}。リバウンドハンマーでは、打撃の衝撃が強いために、採取したコアに適用するのは難しいが、この機械を用いれば、採取したコアの断面から深さ方向の反発硬度の分布を測定することが可能となる。操作が簡易でコンパクトな装置であり、経験の浅い技術者でも精度よく測定を行うことができる。

$$HL = \frac{V}{V_0} \times 1000 \quad (1)$$

HL：反発硬度

V：インパクトボディの反発速度

V₀：インパクトボディの打撃速度

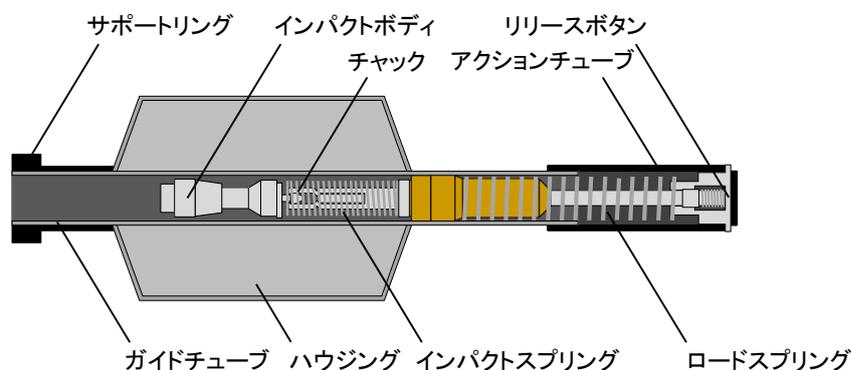


図 5-1 試験機の概要

5.2.2 実験項目および測定概要

エコーチップ硬さ試験機の測定方法の妥当性を検証するために、実際に RABT 曲線により加熱履歴を与えた試験体を用いて深さごとの反発硬度の測定を行い、劣化深さの推定を行った。また、既往の測定方法である変色状況の目視確認、中性化深さおよび圧縮強度の測定の3種類の方法についても同様に実験を行い、エコーチップ硬さ試験機で測定した反発硬度との比較を行った。各測定方法の概要を以下に示す。

(1) エコーチップ硬さ試験機による反発硬度の測定方法

耐火実験後の試験体から直径 100mm のコアを採取し、そのコアの断面を半分に切断した後、可能な試験機で固定し、エコーチップ硬さ試験機を用いて切断面の反発硬度を測定した。加熱面から 200mm までは 10mm 間隔で、200mm 以深は 20mm 間隔で測定した。試験は、JSCE-G 504 に準拠して行った。同一深さの打撃点数は 20 点とし、それぞれの偏差が平均値の±20%以上となる値があれば、その測定値を棄却し、これに代わる測定値を補った。供試体の本数は 3 本とした。測定状況を写真 5-1 に示す。



写真 5-1 測定状況

(2) 変色状況の目視観察

試験体の表面や、採取したコアの表面の目視観察を行い、コンクリートの変色状況から受熱温度を推定し、劣化深さを調査した。

(3) 中性化深さの測定

試験体より直径 100mm のコアを乾式で採取した後、断面と垂直な方向に半分に割裂し、その割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤紫色を呈していない部分の長さを測定した。試験は、JIS A 1152 に準拠して行った。

(4) 圧縮強度の測定

試験体の加熱面から深さ方向に直径 68mm のコアを採取した。コアの断面を深さごとに切断した供試体を作製し、圧縮強度試験を実施した。供試体の種類は、加熱面からの深さごとに 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200 および 300mm の 8 水準とした。供試体の採取方法を図 5-2 に示す。試験は、JIS A 1108 に準拠して行った。供試体の本数は 3 本とした。

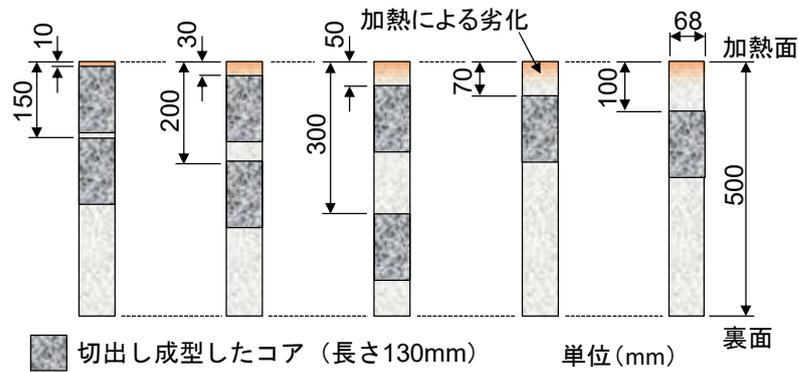


図 5-2 圧縮強度試験用の供試体の採取方法

5.2.3 耐火実験の概要

各測定方法の妥当性を検証するために、耐火実験により高温履歴を与えたコンクリート試験体を作製した。加熱後の試験体の表面からコアを採取し、前項に記述した4種類の方法により劣化深さの推定を行った。耐火実験の概要を以下に示す。

耐火実験に用いた試験体の使用材料を表5-1に示す。また、試験体に用いた耐火コンクリートの配合を表5-2に示す。大深度地下のシールドトンネルには高強度コンクリートが使用されるため、水結合材比は35%とした。爆裂の抑制を目的として、PP繊維の混入率は0.10vol.%とした。

試験体の寸法は、幅1700mm×長さ1900mm×厚さ500mmとし、トンネルの覆工を模擬した平板とした。断面内には14本のPC鋼棒を配置し、設計で考慮している14N/mm²の圧縮応力を作用させながら耐火実験を実施した。耐火実験は、壁用耐火炉を使用し、水平方向から加熱を行った。耐火実験の概要を図5-3に示す。

加熱曲線には、5分で最高温度の1200℃まで昇温し、加熱開始後60分まで最高温度を保持するトンネル火災を想定したRABT曲線を採用した。加熱曲線を図5-4に示す。炉内の温度管理は、試験体表面から100mm離れた位置に設置した熱電対にて行った。耐火実験時はコンクリート内部の温度履歴を測定した。加熱面から0, 25, 50, 75, 100, 200, 300および500mmの位置に熱電対を設置し、各深さの温度履歴を測定した。また、耐火実験後は、試験体を耐火炉から取り出し、試験体表面の観察と爆裂深さの測定を行った。爆裂深さは、試験体の表面を50mm間隔の格子に分割し、その交点ごとにノギスを用いて測定した。

表 5-1 使用材料

種類	記号	各材料の種類および物性
練混ぜ水	W	地下水
セメント	C	高炉セメントB種(低発熱・収縮抑制型), 密度2.98g/cm ³
細骨材	S	砂, 表乾密度2.61g/cm ³ , 粗粒率2.70
粗骨材	G	碎石, 密度2.62g/cm ³ , 実積率60.0%
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
短繊維	PP	PP繊維, 密度0.91g/cm ³ , 繊度17dtex×長さ20mm(アスペクト比410)

表 5-2 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (kg/m ³)	PP (vol.%)
		W	C	S	G		
35.0	54.5	175	500	906	760	6.50	0.10

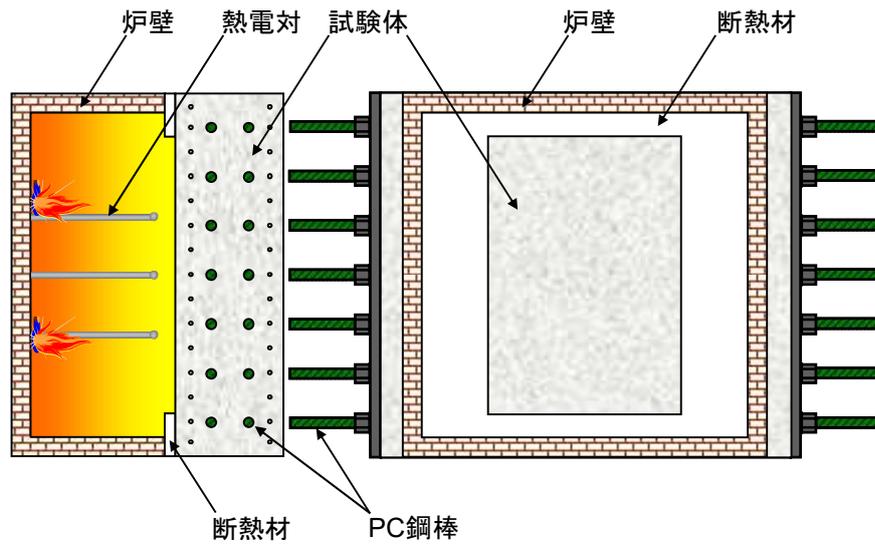


図 5-3 耐火実験の概要

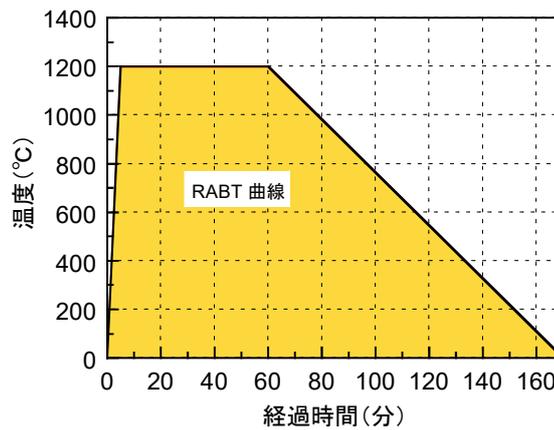


図 5-4 加熱曲線 (RABT 曲線)

5.2.4 実験結果および考察

(1) 耐火実験結果

耐火実験後の試験体表面の状況および爆裂深さの分布図を図 5-5 に示す。PP 繊維を混入することで、爆裂深さは最大で 3mm であり、軽微な剥離が数か所生じたのみであった。爆裂による温度分布の偏りが劣化深さに与える影響は小さいものとする。

耐火実験により得られたコンクリートの加熱面からの深さ方向におけるコンクリートの最高温度分布を図 5-6 に示す。セメントの水和物である水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) は、450~580℃で脱水し生石灰 (CaO) に変化し、炭酸カルシウム (CaCO₃) は、750~900℃で脱炭酸化し CaO に変化するとされている^{15)~17)}。耐火実験の結果から、コンクリートの最高温度は、加熱面では 765℃に達しており、21~35mm の範囲では 450~580℃であった。コンクリートの表層部では、Ca(OH)₂ や CaCO₃ が変質しているものと判断できる。

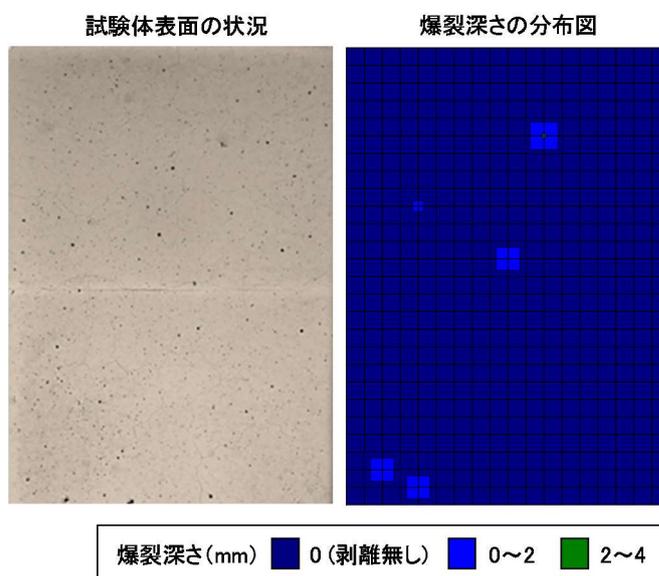


図 5-5 試験体表面の状況および爆裂深さの分布図

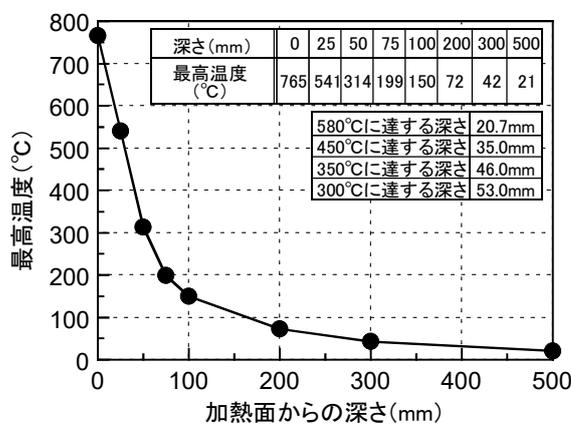


図 5-6 コンクリートの最高温度分布

(2) 各種測定方法による劣化深さの推定結果

採取したコアの状況を写真 5-2 に示す。試験体の表面は、淡黄色を呈しており、900℃～950℃以上の加熱を受けたと判断できる。淡黄色を呈しているのは表面のみであり、表層部は灰白色を呈していた。表層部は、600～950℃の受熱があったと思われる^{16),17)}。試験体表層部の変色具合から判断される温度は、図 5-6 に示す耐火実験により確認したコンクリートの温度とほぼ一致した。表層部から深さ方向にひび割れが生じており、ひび割れ深さは60mm程度であった。

中性化深さの測定結果を写真 5-3 に示す。中性化深さは22mmであった。加熱されたコンクリートは、500℃程度でCa(OH)₂が熱分解してCaOに変化し、pHが減少する。図 5-6 に示す最高温度分布によると、500℃近傍に達する深さは20～30mmであり、中性化深さの測定結果と概ね一致した。既往の知見^{13),16),17)}のとおり、中性化深さの測定は500℃程度の加熱履歴を受け、強度が低下した範囲を簡易的に予測することが可能である。

コア試験体による加熱面からの深さごとの圧縮強度試験結果を図 5-7 に示す。加熱面に近づくほど、圧縮強度は低下した。加熱面から150mmより深い位置については、約70N/mm²で一定であった。深さ150mmまでの範囲のコンクリートは、加熱の影響を受けたものと思われる。いずれの深さの圧縮強度についても、ばらつきの程度に顕著な差異は認められなかった。

エコーチップ硬さ試験機を用いた反発硬度の測定結果を図 5-8 に示す。圧縮強度試験結果と同様に、加熱面に近づくほど反発硬度も低下した。加熱面から150mmより深い位置については、反発硬度は、約830で一定であった。圧縮強度と反発硬度の関係を図 5-9 に示す。圧縮強度の増加に伴い反発硬度も増加しており、両者の間には相関関係が認められた。反発硬度の20点の測定値の標準偏差の分布を図 5-10 に示す。測定箇所ごとにばらつきは認められるものの、加熱面に近い箇所ほど、標準偏差が大きく、ばらつきが大きくなる傾向が認められた。図 5-8 に示すとおり、反発硬度の分布は、20点の測定値を平均することで、ばらつきを平準化することができ、精度の良い強度推定が可能であることが判った。



写真 5-2 コアの変色状況

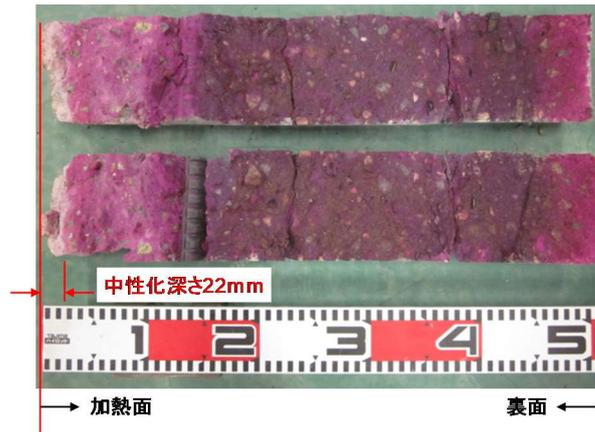


写真 5-3 中性化深さの測定結果

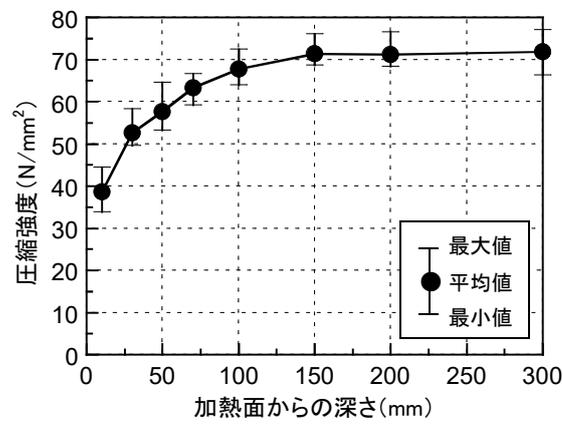


図 5-7 圧縮強度の試験結果

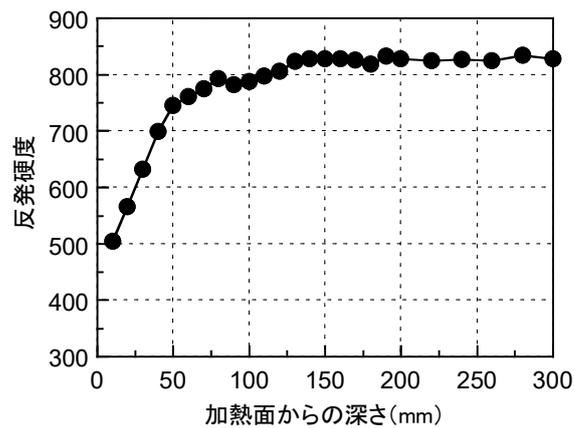


図 5-8 反発硬度の測定結果

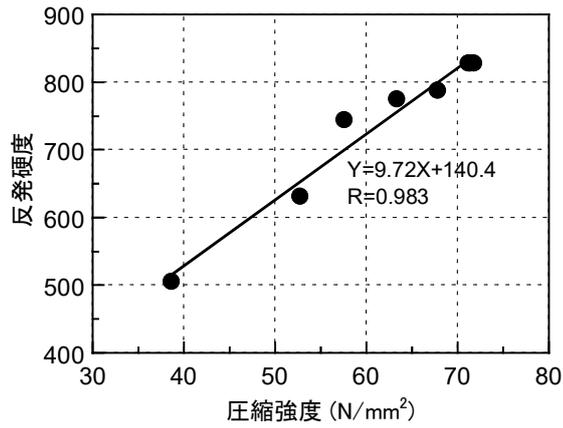


図 5-9 圧縮強度と反発硬度の関係

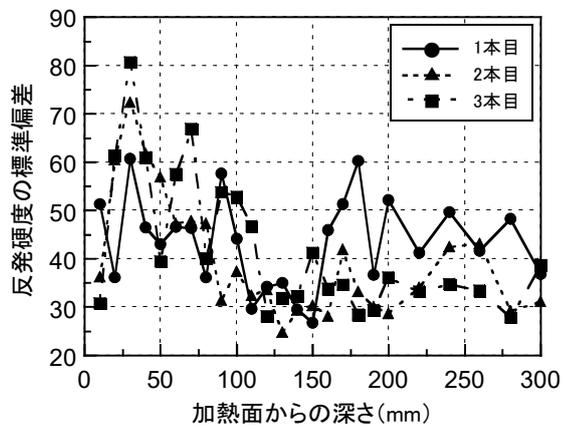


図 5-10 反発硬度の標準偏差の分布

5.2.5 エコーチップ硬さ試験の妥当性の検証

土木学会の指針¹³⁾によると、火災による損傷度の定義としてコンクリートや鋼材の受熱温度によって4分類しており、無被害の区分に該当するコンクリートの受熱温度は300℃未満としている。コンクリート工学会の指針¹⁴⁾には、補修方法の知見について詳細に取りまとめられているが、劣化深さに関しては明確な記述がない。首都高速道路株式会社の設計要領¹⁸⁾によると、コンクリートの許容温度は350℃と設定されている。Fibの指針³⁾によると、補修を行う上での閾値は300℃とされている。また、ITAの指針¹⁹⁾では、補修の閾値は380℃とされており、各規準や指針類で異なる値となっている。Eurocode²⁰⁾に規定されている高温時の圧縮強度残存比は、300℃を超えると傾きが増加している。本研究では、許容温度は300℃と仮定した。

圧縮強度および反発硬度の測定結果から、加熱による影響が小さい加熱面から150mmより深い部分を健全部とし、その範囲の各測定値の平均値を算出した。劣化の程度は、各深さの測定値を健全部の測定値の平均値で除して無次元化し、健全部に対する割合として評価した。測定方法の妥当性を確認するために、圧縮強度および反発硬度における健全部に対する割合の分布（以下、測定値と呼称）と耐火実験より得られた受熱温度より推定した残存圧縮強度の分布（以下、推定値と呼称）とを比較することとした。比較に用いる残存圧縮強度の分布は、**図 5-11**に示す加熱による一般的なコンクリートの残存圧縮強度の分布と**図 5-6**に示す耐火実験により得られた最高温度の分布より算出した。測定値と推定値との比較を**図 5-12**に示す。圧縮強度と反発硬度の健全部に対する割合の分布は、ほぼ一致した。また、測定値と推定値は概ね一致した。健全部に対する割合は、測定値と推定値の両者とも深さ50mm近傍より小さい範囲で強度低下の傾きが変わった。

著しい強度低下を防止するためのコンクリートの許容温度を300℃と仮定すると、**図 5-6**に示す耐火実験より得られた温度データから最高温度が300℃に達する深さは53mmであった。今回の実験結果から、圧縮強度と反発硬度の両者ともに、健全部に対する割合の傾きが大きく変化する箇所は加熱面から50mm近傍であった。圧縮強度および反発硬度の測定結果は、耐火実験より得られた温度データとほぼ一致する結果であり、許容温度として仮定した300℃の設定を裏付けるとともに、エコーチップ硬さ試験の妥当性を確認できた。加熱により強度低下した範囲の推定が可能であると考えられる。

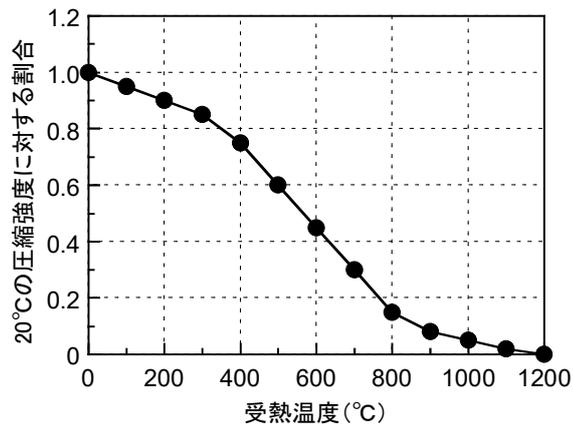


図 5-11 コンクリートの残存圧縮強度分布

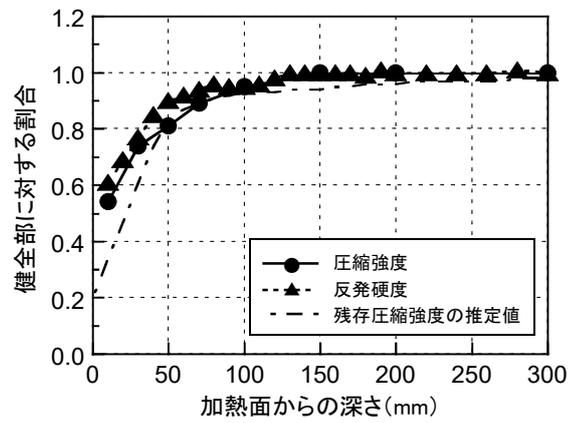


図 5-12 反発硬度と圧縮強度の推定値との比較

5.3 耐火性を有する補修技術の提案

トンネルの覆工が、火災により高温履歴を受けた場合、表層部のコンクリートは強度や耐久性が低下するため、劣化部を除去し、補修を行う必要がある。耐火被覆を設置することなく、トンネルの覆工のコンクリート自体に耐火性を付与する場合には、次の火災に備えて、耐火性を有する材料により補修を行う必要がある。また、火災に限らず、経年劣化等により、剥離および剥落が生じた場合にも、同様の補修が必要となる。そのため、劣化部を除去する方法および耐火性を付与した補修技術を確立する必要がある。

劣化部を除去する方法として、ウォータージェット（以下、WJ と呼称）による劣化部除去工法を検討した。この方法によれば、健全部を傷めることなく、劣化部のみを除去することが可能となる。さらに、構造体コンクリートの補修では、耐久性や一体性を確保する目的で、一般に PCM が用いられる。そこで、耐火コンクリートと同様に PCM に PP 繊維を混入することで耐火性を付与した補修技術について検討した。補修技術は吹付け工法と左官仕上げ工法の 2 種類について検討した。

本節では、WJ による劣化部除去工法、耐火性を有する吹付け工法および耐火性を有する左官仕上げ工法について、耐火実験により性能を確認した結果について述べる。

5.3.1 ウォータージェットによる劣化部除去工法

WJ による研り性能を確認するために、実際に耐火実験により RABT 曲線による加熱履歴を与えた試験体を用いて、劣化部の除去実験を行った。実験には、幅 800mm×厚さ 500mm×長さ 4700mm の試験体を使用し、加熱区間は、試験体の中央部（長さ 2400mm の範囲）とした。コンクリートには、セグメントで一般に使用される設計基準強度 48N/mm² のコンクリートを使用した。WJ による除去には、超高圧水発生装置、研り装置、発電機、油圧ユニット、水タンクおよびバキューム車を用いて行った。WJ による研り状況を写真 5-4 に示す。

耐火実験後の爆裂深さおよび WJ による研り深さの測定結果を図 5-13 に示す。耐火実験後の爆裂深さの最大値は 31mm、平均値は 4.2mm であり、WJ により劣化部を研った後の深さは、最大値が 79mm、平均値が 44.5mm であった。耐火実験により爆裂した部分については、加熱による劣化の度合いが大きく、研り深さも増大し、爆裂深さと WJ による劣化部の研り深さは、概ね一致した。コンクリートの許容温度を 300℃と仮定すると、耐火実験時に測定した温度履歴の測定により 300℃に達する深さは、56.5mm であった。WJ による研り深さは若干小さい結果ではあるが、概ね劣化部を除去できることが確認できた。実験では、水圧を 80～100N/mm² 程度に調節し、試験体表面から研り装置の先端までの離隔距離を 100～200mm としたが、若干圧力を増加するか、離隔距離を短くすることで、加熱により劣化した部分を除去できると考えられる。

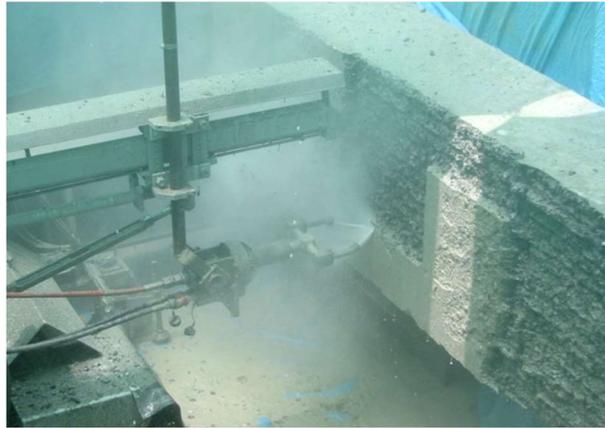
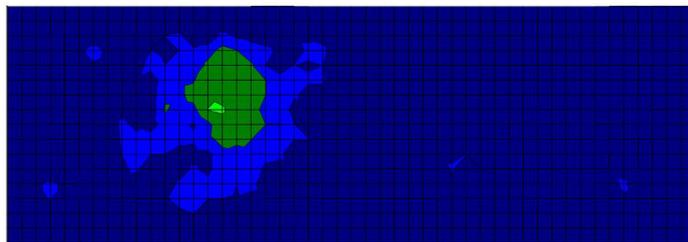
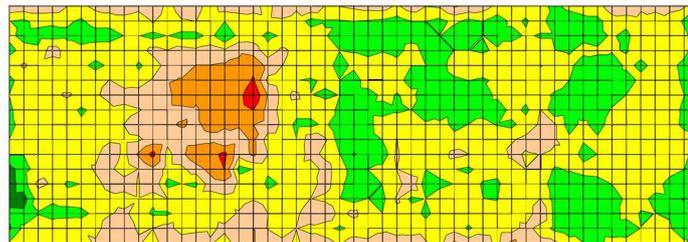


写真 5-4 WJによる研り状況



耐火実験後の爆裂深さの分布



ウォータージェットによる研り深さの分布

爆裂深さおよび研り深さ (mm)			
70~80	60~70	50~60	40~50
30~40	20~30	10~20	0~10

図 5-13 爆裂深さおよびWJによる研り深さの分布

5.3.2 耐火性を有する吹付け工法

一般のコンクリート構造物の補修工法として、これまでに、液体急結剤を使用したPCMを用いた吹付け工法を開発している²⁾。この工法に使用するPCMにPP繊維を混入することで耐火性を付与した吹付け工法を検討した。

PCMはプレミックス材料とし、ポリマーには酢酸ビニル・アクリル等の共重合樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を使用した。ポリマーの添加率は結合材に対して5%とした。セグメントの補修を想定して、設計基準強度は48N/mm²とし、水結合材比は38%とした。

PP繊維を混入したPCMを練り混ぜた後、このモルタルと急結剤を専用のポンプにて圧送し、吹付けノズルの先端にて混合した。コンプレッサーにより空気を送り、モルタルを噴出させることにより吹付けを行った。吹付けシステムの概要を図5-14に示す。また、吹付けの状況を写真5-5に示す。

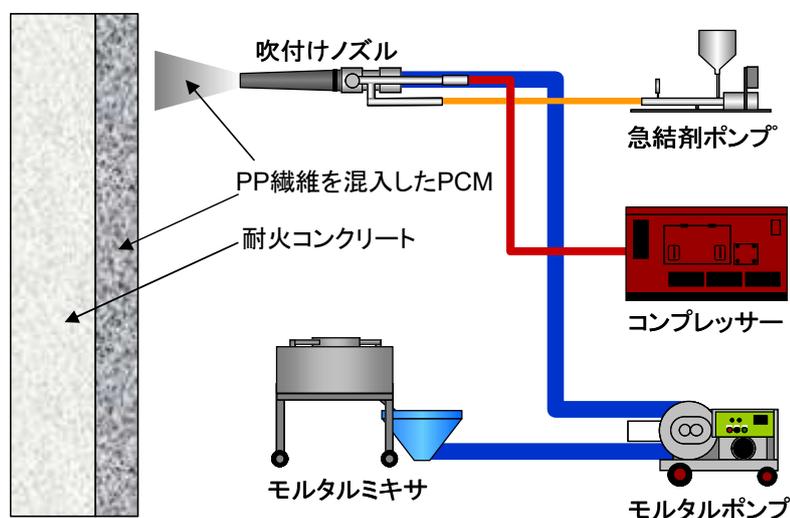


図 5-14 吹付けシステムの概要



写真 5-5 吹付けの状況

(1) フレッシュモルタルの品質の確認と繊維の選定

4章でも報告したとおり、PP 繊維の混入により、ベースのモルタルの流動性は大きく低下することが懸念される。吹付けを行う際に、ポンプ圧送時の閉塞を防止するには、これまでの研究から、モルタルの15打の目標フロー値（JIS R 5201）は、下限で180mmを確保する必要があることが分かっている。そこで、PP 繊維を混入したPCMの15打のフロー値を確認した。実験に使用したPP 繊維の一覧を表5-3に示す。PP 繊維には、3章で選定した繊維度17dtex×長さ20mmの繊維および繊維度2.2dtex×長さ10mmの繊維を使用した。また、吹付けにおいては、圧送ホースの直径が小さく、流動性の低下が懸念されたので、繊維度は同一とし、長さを低減した繊維度17dtex×長さ10mmおよび繊維度2.2dtex×長さ3mmの繊維についても併せて検討した。PP 繊維の混入率は、0.2、0.5および1.0vol.%の3水準とした。

モルタルの練混ぜは、パン型ミキサを用いて行い、PCMを3分間練り混ぜた後に、PP 繊維を混入し、さらに1分間練混ぜを行った。各配合について、JIS R 5201に準拠して、モルタルのフロー値（15打）を測定した。PP 繊維の混入率とフロー値の関係を図5-15に示す。繊維度17dtex×長さ20mmおよび繊維度17dtex×長さ10mmのPP 繊維については0.50vol.%以下、繊維度2.2dtex×長さ3mmのPP 繊維については0.20vol.%以下とすることで、目標とするフロー値を確保できた。PCMは爆裂が生じやすいためPP 繊維の混入率の増加が想定されること、圧送性の観点からフロー値の低下量が小さい繊維が望ましいこと、および耐爆裂性の確保の観点からアスペクト比の大きい繊維が望ましいことを勘案すると、吹付けによる補修に用いるモルタルには、繊維度17dtex×長さ10mmのPP 繊維を使用することとした。

表 5-3 PP 繊維の一覧

PP繊維の種類	織度 (dtex)	換算直径 (μm)	長さ (mm)	アスペクト比
A	17	48.8	20	410
B	17	48.8	10	205
C	2.2	17.5	10	570
D	2.2	17.5	3	171

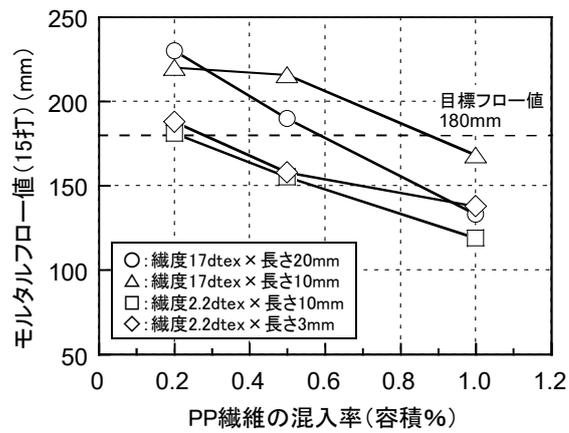


図 5-15 PP 繊維の混入率とモルタルのフロー値の関係

(2) 耐火性の検証

PP 繊維を混入した PCM について、耐火実験により耐爆裂性を確認した。実験に使用した PP 繊維は繊維度 17dtex×長さ 10mm でアスペクト比 205 の繊維とし、PP 繊維の混入率は 0, 0.10, 0.30 および 0.5vol.% の 4 水準とした。

試験体の概要図を図 5-16 に示す。耐火コンクリートの寸法は、縦 1200mm×横 1200mm×厚さ 200mm とし、吹付け厚さは 100mm とした。4 分割してケースごとに吹き付けた。ベースコンクリートと吹付けモルタルとの一体性を強化するために、吹付け前に耐火コンクリートの表面に吸水調整材を塗布し、剥落防止のためにステンレス製のアンカーおよびワイヤーを設置した。試験体を作製後屋内にて保管し、材齢 28 日で耐火実験を実施した。

耐火実験には、水平炉を使用した。試験体を水平炉の上部に設置し、吹付け面を加熱した。加熱曲線として、3 章の実験と同様にトンネル火災を想定した RABT 曲線を使用した。耐火実験後、耐火炉から試験体を取り出し、爆裂深さを測定した。爆裂深さは、試験体の表面を 50mm 間隔の格子に分割し、その交点ごとにノギスを用いて測定した。

試験体の表面の状況および爆裂深さの分布を図 5-17 に示す。PP 繊維を混入していない試験体は、全体に激しい爆裂が生じ、補修部のほとんどが剥落した。PP 繊維の混入率の増加に伴い、爆裂深さは低下しており、PP 繊維を 0.5vol.% 混入することで爆裂を防止することができた。

これまでの実験により、劣化深さは 50mm 程度であることを確認している、そのため、遮熱性については、耐火コンクリートの厚さを 450mm とし、吹付けによる補修厚さを 50mm とした試験体を用いて確認した。試験体の概要を図 5-18 に示す。加熱面からの深さと最高温度の関係を図 5-19 に示す。300℃に達する深さは 45.4mm であり、吹付け厚さ 50mm で耐火コンクリートの温度を 300℃以下に抑制できることを確認した。

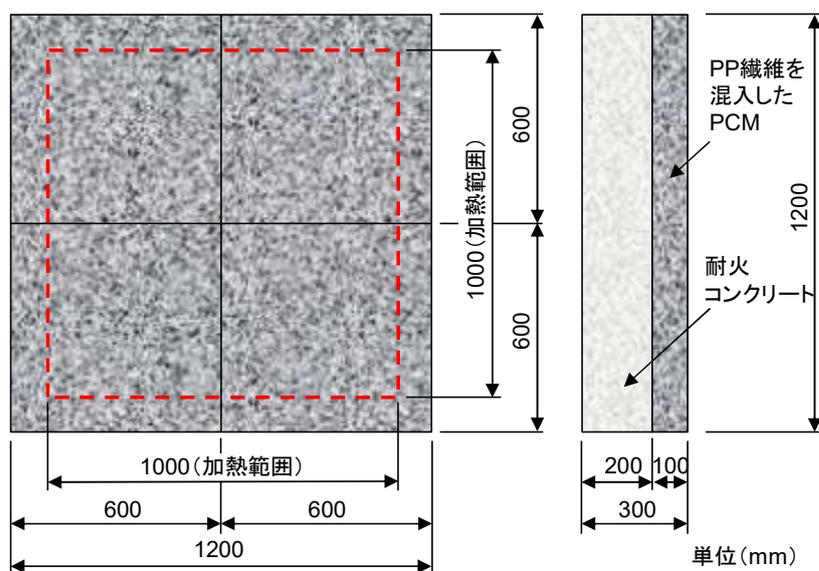


図 5-16 耐火実験に用いる試験体の概要（耐爆裂性確認用）

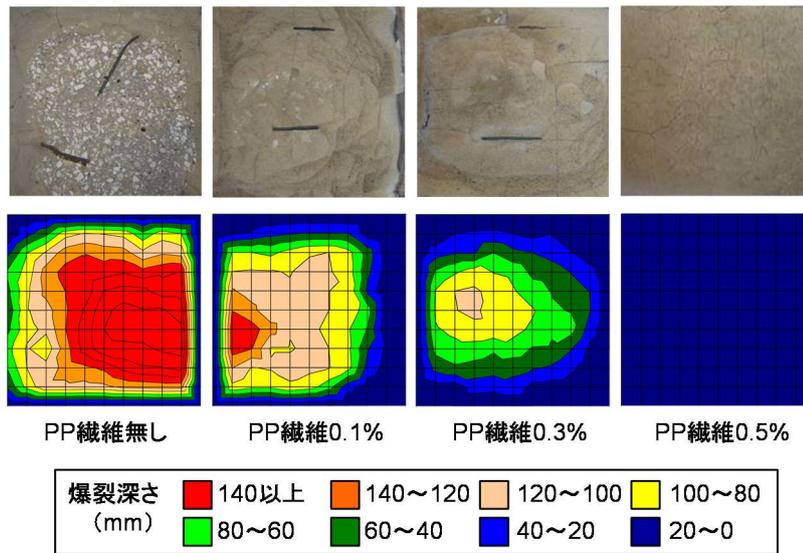


図 5-17 試験体の表面の状況および爆裂深さの分布

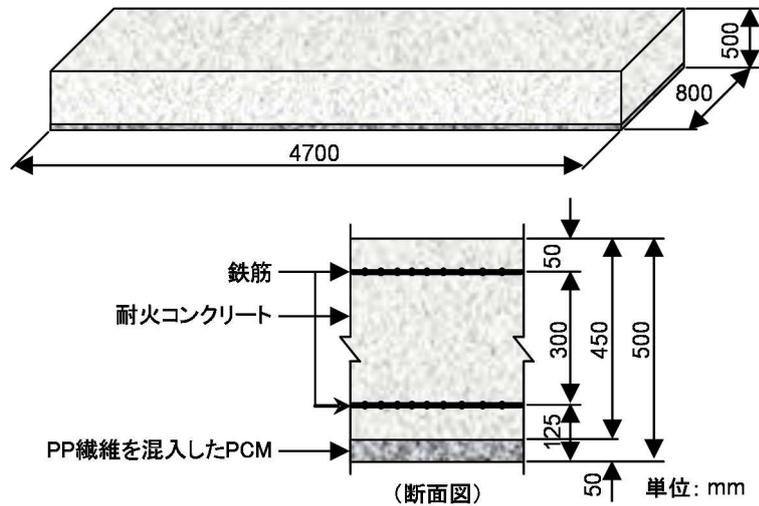


図 5-18 耐火実験に用いた試験体の概要 (遮熱性確認用)

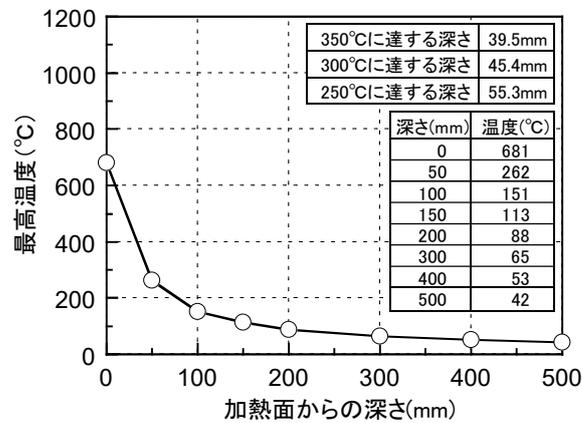


図 5-19 加熱面からの深さと最高温度の関係

5.3.3 耐火性を有する左官仕上げ工法

ひび割れなどにより耐火コンクリートの一部に浮きや剥離が生じた場合には、部分的な補修が求められる。火災が発生した場合など、比較的に広範囲の補修を行う場合には、5.3.2項に示した吹付け工法が有効であるが、吹付け機械の設置に手間と費用を要する。そのため、部分的な補修においては、左官仕上げによる施工が求められる。そこで、市販の左官仕上げ用のPCMにPP繊維を混入した耐火性を有する左官仕上げ工法について検討した。

PCMはプレミックス材料とし、ポリマーにはアクリル系粉末樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を使用した。ポリマーの添加率は結合材に対して1.3%とした。設計基準強度は、吹付け工法と同様に48N/mm²とし、水結合材比は30%とした。PP繊維の種類は、3章で最も爆裂抑制効果の高かった繊維度2.2dtex×長さ10mmのアスペクト比570の繊維とした。PP繊維の混入率は、前項の耐火実験結果から0.5vol.%とした。

(1) フレッシュモルタルの品質

吹付け工法では、JIS R 5201におけるモルタルの15打の目標フロー値は180mmとしたが、左官仕上げでは、仕上げ後にダレや剥落が生じないように、目標とするモルタルの15打のフロー値を150mmとした。練混ぜは、吹付け工法と同様にパン型ミキサを用いて行い、PCMを3分間練り混ぜた後に、PP繊維を混入した後、さらに1分間練混ぜを行った。

練混ぜの結果、モルタルの15打のフロー値は、132mmであった。目標値より若干小さい値であったが、左官仕上げに必要な流動性は確保できており、施工が可能であることを確認した。

(2) 耐火性の検証

耐火実験に用いる試験体の概要を図 5-20 に示す。また、モルタルの打込み状況を写真 5-6 に示す。実際の補修を想定して、窪みを設けた平板状の試験体をあらかじめ作製し、その窪みに補修材を塗り付けた。試験体の寸法は、縦 1700mm×横 1700mm×厚さ 400mm とした。浮きや剥離により部分的な補修を行う場合、表層部のみ補修を行う場合と覆工の内部まで除去して補修を行う場合が想定される。そこで、窪みの深さは 30mm と 200mm の 2 種類とした。平面的には、幅 550mm×長さ 1200mm の大きさとし、1 体の試験体で 2 種類の補修を行った。加熱範囲は、補修を行った範囲を含む 1400mm ×1400mm の範囲とした。窪みの部分に補修材を打ち込み、金ごてを用いて仕上げた。耐火コンクリートとモルタルとの一体性を強化するために、打継面には、あらかじめ吸水調整材を塗布した。窪みの深さが 30mm のケースについては、剥落防止のために、ステンレス製のアンカーおよびメッシュ筋を設置した。試験体を作製後屋内にて保管し、材齢 26 日で耐火実験を実施した。

耐火実験には、3 章の実験と同様に壁用の耐火炉を使用した。加熱曲線についても 3 章の実験と同様にトンネル火災を想定した RABT 曲線とした。耐爆裂性を確認するために、耐火実験後に試験体を取り出し、爆裂深さの測定を行った。爆裂深さは、試験体の表面を 50mm 間隔の格子に分割し、その交点ごとにノギスを用いて測定した。また、遮熱性を確認するために、熱電対を加熱面より 0, 30, 60, 100, 200 および 400mm の位置に設置し、試験体内部の温度履歴を測定した。

耐火実験後の試験体の状況を写真 5-7 に示す。耐火実験の結果、爆裂は認められなかった。繊維度 2,2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を容積比で 0.5vol.%混入することで、爆裂を防止できることが分かった。また、加熱時に特に大きな変形や剥離・剥落は認められなかった。

加熱面からの深さと最高温度の関係を図 5-21 に示す。最高温度の分布は、深さ 30mm と 200mm でほぼ一致した。モルタルの許容温度を 300℃と仮定すると、300℃に達する深さは 50mm 程度であり、吹付け工法と同程度の遮熱性を有することを確認した。

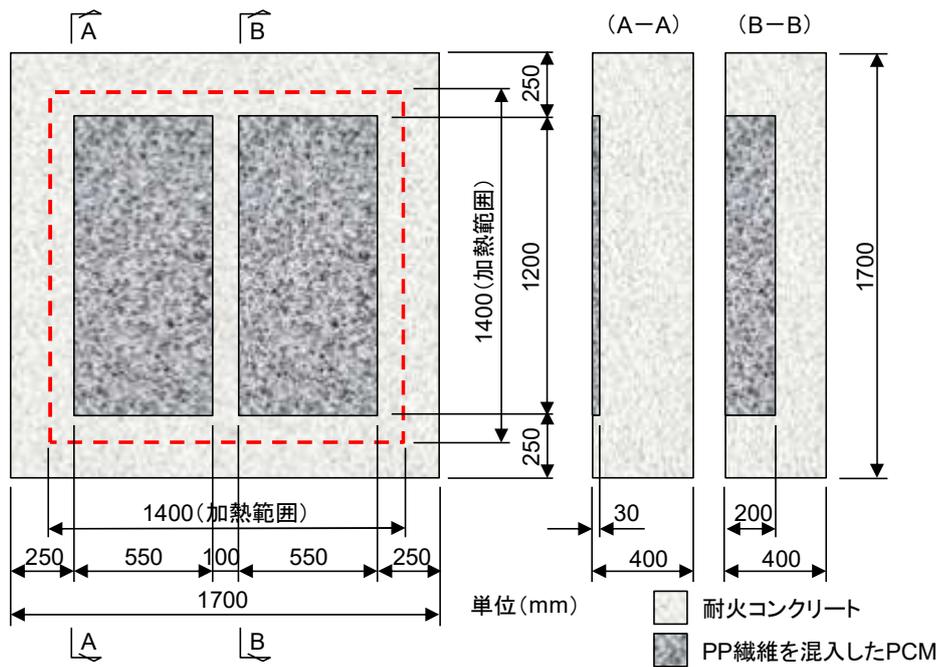


図 5-20 耐火実験に用いる試験体の概要



写真 5-6 モルタルの打込み状況



補修厚さ30mm

補修厚さ200mm

写真 5-7 耐火実験後の試験体の状況

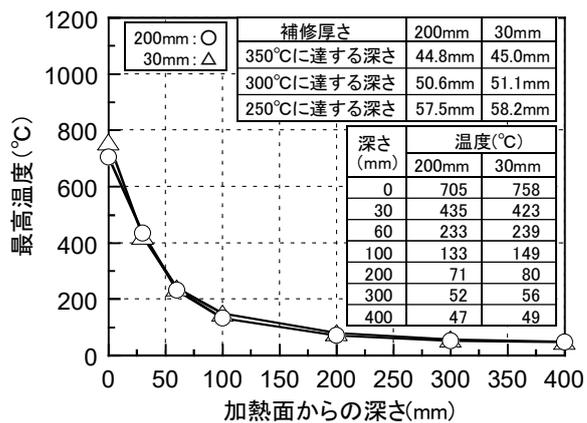


図 5-21 加熱面からの深さと最高温度の関係

5.4 まとめ

シールドトンネルにおける覆工コンクリートが火害を受ける場合に備えて、劣化範囲の簡易な調査方法、劣化部の除去方法および補修方法について検討を行った。火害を受けた覆工コンクリートに対して、RABT 曲線による加熱に耐えうる補修技術を提案した。

本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) RABT 曲線による加熱を受けたコンクリートより採取したコアを半割に切断した供試体を用いて、エコーチップ硬さ試験機により反発硬度を測定することで、簡易に劣化深さを推定できる。採取したコアより測定した圧縮強度や耐火実験の温度データから推定した圧縮強度の分布と同様な傾向を得ることができ、測定方法の妥当性を確認した。
- (2) 目視観察による変色状況や中性化深さの測定結果は、耐火実験により得られた受熱温度の結果と一致しており、既存の方法の妥当性を再確認した。
- (3) ウォータージェットを用いて、水圧やコンクリート表面から研り装置の先端までの離隔距離を調節することで、加熱により劣化した部分のみを除去できることを確認した。
- (4) 酢酸ビニル・アクリル系の共重合樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を結合材の 5% 添加し、繊度 17dtex × 長さ 10mm の PP 繊維を 0.5vol.% 混入したポリマーセメントモルタルを用いることで、RABT 曲線に耐えうる耐火性を有する吹付け補修が可能であることを確認した。
- (5) アクリル系の樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を結合材の 1.3% 添加し、繊度 2.2dtex × 長さ 10mm の PP 繊維を 0.5vol.% 混入したポリマーセメントモルタルを用いることで、RABT 曲線に耐えうる耐火性を有する左官補修が可能であることを確認した。
- (6) 補修部にメッシュ筋を配置することで、RABT 曲線による加熱履歴を受けても劣化部の剥落を防止することが可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 宮川豊章, 大即信明, 上東泰, 小柳光生, 清水昭之, 守分敦郎: コンクリート補修・補強ハンドブック, 朝倉書院, pp.425-430, 2011
- 2) 小林幸一, 枝広英俊: 火害を受けたコンクリート構造物に対する非破壊・微破壊試験の適用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol73, No.629, pp.1027-1034, 2008
- 3) fib: Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment, No.46, 2008
- 4) 上野亮一: エコーチップ硬さ試験機, 熱処理, Vol.23, No.6, pp.375-378, 1983
- 5) Hack, H. R. G. K., Hingira, J and Verwaal, W. :Detrmination of discontinuity wall strength by Equotip and ball rebound tests, international Journal of Rock Mechanics and Science & Geomechanics Abstracts, Vol.30, pp.151-155. 1993
- 6) 村宮諒哉, 吉田秀典, 巽隆有: エコーチップ硬度試験による岩質材料の力学的特性の簡易評価に関する研究, 土木学会論文集, A2 (応用力学), Vol.62, No.2, pp. I_405-416, 2011
- 7) Aye, T., Oguchi, C.T., Tanaka, Y., "Evaluation of sulfate resistance of Portland and high alumina cement mortars using hardness test.", Construction and Building Materials, 24, 6, pp.1020-1026, 2010
- 8) Coombes, M.A., Feal-Perez, A., Naylor, L.A., Wilhelm, K., "A non-destructive tool for detecting change in the hardness of engineering materials: Application of the Equotip durometer in the coastal zone." Engineering Geology, 167, pp.14-19, 2013
- 9) Proceq, "Equotip portable hardness testers – Leeb [online]." Rockwell & UCI, Equotip Piccolo / Bambino 2. Available from: <<https://www.proceq.com/compare/equotip/>> [Accessed 21 Mar 2019], 1975
- 10) ASTM A956 "Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products." West Conshohocken: ASTM International, 1996
- 11) DIN EN 50156-1 "Electrical equipment for furnaces and ancillary equipment - Part 1: Requirements for application design and installation; German version prEN 50156-1, 2012.", 2007
- 12) 青木久, 松倉公憲: エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察, 地形, Vol.25, No.3, pp.267-276, 2004
- 13) 土木学会: トンネル構造物のコンクリートに対する耐火工設計施工指針 (案), コンクリートライブラリー, Vol.143, 2014
- 14) 日本コンクリート工学会: コンクリートの高温特性と構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書, 2012
- 15) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, 2017
- 16) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'19 [基礎編], 2019
- 17) 日本コンクリート工学会: 高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会報告書, 2017
- 18) 首都高速道路株式会社: トンネル構造物設計要領 (シールド工法編), 第3編 耐火設計, pp.1-27, 2008
- 19) ITA and AITES, "GUIDELINES FOR STRUCTURAL FIRE RESISTANCE FOR ROAD TUNNELS."

Working Group No.6 Maintenance and Repair, 2004

- 20) EN 1994-1-2: “Eurocode 4: design of Composite Steel and Concrete Structure, part 1-2: structural fire design, “ Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2005
- 21) 伊藤正憲, 青木茂, 平田隆祥, 早川健司, 阿部宏, 鳥取誠一: 液体急結剤を使用した高品質ポリマーセメント系断面修復吹付け工法の開発, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.3, pp.459-472, 2006

第6章 覆工への耐火工構築技術の適用検討

6.1 はじめに

3章では、耐爆裂性を確保するための最適なPP繊維の選定と水結合材比に応じたPP繊維の混入率について検討を行った。また、4章では、3章にて選定したPP繊維を所定量混入するためのベースコンクリートの配合の修正方法について提案した。本章では、この結果を踏まえて、シールドトンネルの覆工への適用に向けた具体的な耐火工の構築技術について検証を行うことを目的とした。耐火工の構築に向けた要求性能の検証方法を図6-1に示す。

2章でも述べたが、部材の大きさが増加したり、圧縮応力が作用すると爆裂が生じやすくなるとの知見がある¹⁾²⁾。首都高速道路株式会社の設計要領（以下、設計要領と呼称）では、耐火実験時の照査項目として、実際のセグメントと同等の試験体を用いて、設計断面力を導入して加熱することが望ましいとしている³⁾。3章では小型の試験体を用いて圧縮応力が作用していない状態で耐爆裂性の確認を行ったが、実際のセグメントは寸法が大きい。また、シールドトンネルには土圧や水圧などの荷重により圧縮応力が作用するため、覆工への実適用を考える場合、この圧縮応力が作用する場合の耐爆裂性について確認を行う必要がある。一方、3章では耐爆裂性に関して検討を行ったが、覆工コンクリートの耐火性には、耐爆裂性の他に遮熱性も必要となる。そのため、鉄筋の受熱温度を許容範囲に収めるために必要なかぶりについて確認を行う必要がある。そこで、耐火性を有する覆工コンクリートを提案するために、実際の覆工を想定した実規模の試験体を用いて、設計で想定する圧縮応力を作用させた状態で、RABT曲線による耐火実験を行い、使用する耐火コンクリートの品質や耐火性の検証を行った。

また、シールドトンネルの覆工は、セグメントと呼ばれるコンクリート二次製品を用いてリング状に組み立てて構築するが、本線とランプが接続するトンネルの拡幅部においては、セグメントでシールドトンネルを構築した後にセグメントを切り開き、現場打ちのコンクリートで覆工を構築することも求められる。現場打ちコンクリートの場合、プラントにてベースコンクリートを製造し、打込み場所にてPP繊維を投入して打ち込む必要があり、施工に手間と時間を要する。そのため、現場打ちコンクリートについては、実際の施工を模擬した施工実験を行い、施工性の検証を行った。

本章ではセグメントと現場打ちコンクリートの2種類について、耐火コンクリートの適用性の検討を行った。

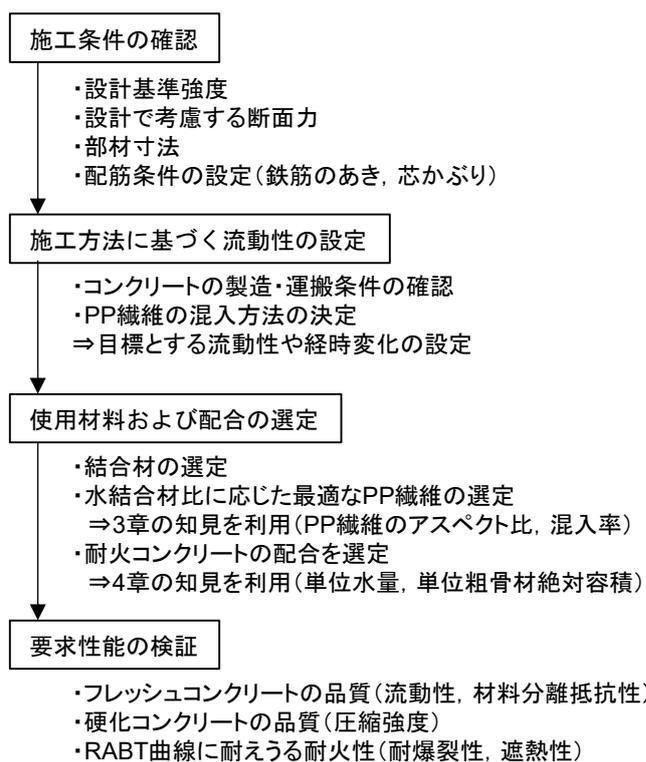


図 6-1 耐火工の構築に向けた要求性能の検証方法

6.2 セグメントへの適用検討

6.2.1 鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントへの適用

シールドトンネルの覆工コンクリートには、一般に鉄筋コンクリートセグメントが用いられる。しかし、コンクリートの剥落防止、ひび割れの分散および耐久性の向上によりセグメントの品質を向上し、主鉄筋の低減や配力筋の省略によりコスト縮減を図るために、鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント（以下、SFRCセグメントと呼称）の適用が進められている⁴⁾。SFRCセグメントの概要を図6-2に示す。このセグメントに用いるコンクリートには、鋼繊維の分散性の向上やテーブルバープレータの省力化の観点から高流動タイプを使用している。

耐火性が求められるシールドトンネルへのSFRCセグメントの適用を目的として、このSFRCセグメントに耐爆裂性を付与するために、3章および4章で得られた成果を適用して、PP繊維を混入した鋼繊維補強高流動コンクリートを用いたSFRCセグメントの耐火性の検討を行った。本節では、PP繊維を混入した鋼繊維補強高流動コンクリートを用いて、実際のセグメントを模擬した試験体を作製し、耐火実験により耐火性を検証した。

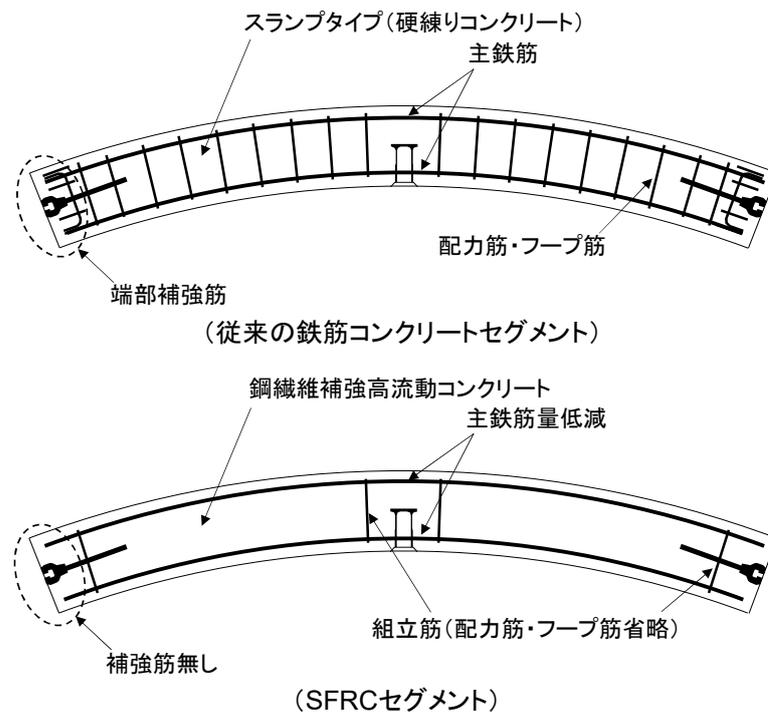


図 6-2 SFRC セグメントの概要⁴⁾

6.2.2 セグメントの要求性能および確認項目

耐火性を有するセグメントを製造するためには、使用する耐火コンクリートには、所要のフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質や、RABT 曲線に耐えうる耐火性が求められる。耐火コンクリートの目標性能を表 6-1 に示す。6.2.1 項に示したとおり、SFRC セグメントを対象として、使用するコンクリートは高流動タイプとし、目標とするスランプフローは 60cm とした。目標とする空気量は 2.0% とした。通常セグメントには、設計基準強度が 40~48N/mm² 程度の高強度コンクリートが使用されることが多い。本章では、爆裂に対して厳しい条件を想定して設計基準強度を 48N/mm² (管理材齢 56 日) とし、水結合材比を選定することとした。また、二次製品工場において一日一回の型枠の転用を考えると、材齢 20 時間で脱型時に必要な 15N/mm² 以上の圧縮強度が必要であるため、併せて確認を行った。

覆工コンクリートの耐火性には、耐爆裂性と遮熱性の 2 項目が要求される。3 章にて耐爆裂性について、最大爆裂深さに応じた PP 繊維の混入率について述べた。本章では、できるだけ爆裂を抑制するという観点から、最大爆裂深さを 10mm 未満に抑制することを目標とした。遮熱性については、設計要領には鉄筋の許容温度は 300℃ とされており³⁾、鉄筋の温度が 300℃ 以下となるようかぶりを確保することを目標とした。

表 6-1 耐火コンクリートの目標性能

項目	準拠規格	目標値
スランプフロー	JIS A 1150	60±10cm
空気量	JSCE-F 513	2.0±1.5%
圧縮強度	JIS A 1108	(材齢20時間)15N/mm ² 以上
		(材齢56日)60N/mm ² 以上
耐爆裂性	RABT 曲線による耐火実験	最大爆裂深さが10mm未満
遮熱性		鉄筋の温度が300℃以下

6.2.3 耐火性の検証概要

(1) 使用材料、配合および製造

コンクリートの使用材料の一覧を表 6-2 に示す。また、コンクリートの配合を表 6-3 に示す。3章の結果より、耐爆裂性を確保するために使用する PP 繊維には、最も爆裂の抑制に効果的な繊維度 2.2dex×長さ 10mm でアスペクト比 570 の繊維を使用することとした。グリーン調達と塩害に対する耐久性を向上させるために、結合材に混和材として高炉スラグ微粉末を 50%置換した。設計基準強度は 48N/mm² のセグメントを対象とし、これまで配合検討の実績から水結合材比は 28.8%とした。鋼繊維の混入率はこれまでの実績より 0.6vol.%とした。3章の結果より、この SFRC セグメントの配合にさらに PP 繊維を 0.2vol.%混入することとした。試験体の配合は 4章で得られた知見をもとに、単位水量と単位粗骨材絶対容積を低減して配合を組み立てた。

コンクリートは、実際に二次製品工場における実機ミキサを使用して練混ぜを行った。ミキサには公称容量 1m³ の二軸強制練りミキサを使用し、1バッチの練混ぜ量を 0.9m³ とし、2バッチの練混ぜを行い、試験体の打込みを行った。PP 繊維は室内試験と同様にベースコンクリートを 2分間練り混ぜた後に、鋼繊維と PP 繊維を投入し、さらに 1分間練り混ぜた。

表 6-2 使用材料

種類	記号	各材料の種類および物性
練混ぜ水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
混和材	BS	高炉スラグ微粉末, 密度2.89g/cm ³
細骨材	S	砂, 密度2.62g/cm ³ , 粗粒率2.84
粗骨材	G	碎石, 密度2.66g/cm ³ , 粗粒率6.73
減水剤	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
短繊維	SF	鋼繊維, 密度7.85g/cm ³ , 直径0.6×長さ30mm
	PP	PP繊維, 密度0.91g/cm ³ , 繊維度2.2dtex×長さ10mm (アスペクト比570)

表 6-3 配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						PP (vol.%)	SP (B×%)
		W	C	BS	S	G	SF		
28.8	55.0	215	373	373	738	612	47	0.20	0.800

※B:結合材(C+BS)

二次製品工場での製造を想定して、初期の養生として蒸気養生を行った。蒸気養生の温度設定を図 6-3 に示す。セグメントの脱型を想定して、材齢 20 時間で 15N/mm^2 以上確保できるように設定した。コンクリートの打込み後、前養生として 2 時間は 20°C で保温した。最高温度は 40°C とし、昇温速度は $20^\circ\text{C}/\text{時間}$ とした。最高温度の保持時間は 3.5 時間とした。

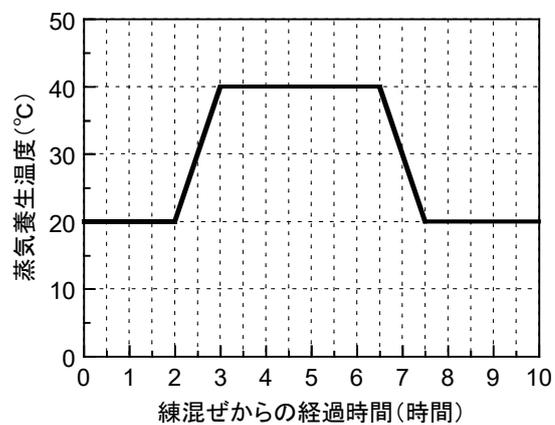


図 6-3 蒸気養生の温度設定

6.2.4 耐火性の検証結果

コンクリートの品質試験結果を表 6-4 に示す。いずれの試験項目についても目標値を満足する結果が得られた。3 章および 4 章の知見をもとに、PP 繊維の種類や混入率を選定し、SFRC セグメントの配合を組み立て、実機ミキサによる練混ぜを行うことによりコンクリートの品質を確認した結果、所要の耐火コンクリートを製造できることを確認した。

耐火実験後の試験体の爆裂深さの測定結果を併せて表 6-4 に示す。また、爆裂深さの分布を図 6-6 に示す。最大爆裂深さは 5mm、平均爆裂深さは 0.4mm であり、軽微な爆裂に抑制でき、目標とする 10mm 未満に収まった。爆裂面積率は 20.9% であり、3 章で示した小型の試験体の結果と比べて、爆裂面積率については若干大きい値であったが、最大爆裂深さや平均爆裂深さは同程度であり、爆裂の程度に顕著な差異は認められなかった。幅 500mm×長さ 1000mm×厚さ 200mm 程度の試験体を用いて耐火実験を行うことにより、耐爆裂性を十分評価できるものとする。

コンクリート内部の温度履歴を図 6-7 に示す。炉内の温度は、概ね RABT 曲線に沿って推移した。また、どの測点においても局所的な変曲点はなく、爆裂による特異点は認められなかった。加熱面から 0mm のコンクリートの表層部の最大温度は、700℃～900℃であり、1200℃まで達しなかった。コンクリートの表層部は、加熱により受けた熱が内部に伝導されたためと思われる。

加熱面からの深さとコンクリートの最高温度の関係を図 6-8 に示す。鉄筋の許容温度を 300℃と仮定すると、その温度に達する加熱面からの深さは、52mm となった。今回の実験では、鉄筋の芯かぶりを 75mm としており、十分なかぶりであることを確認した。鉄筋の熱伝導率は、コンクリートの熱伝導率に比べて大きいため、鉄筋の温度はコンクリートの温度と一致すると考える。そのため、鉄筋の温度を許容温度の 300℃以下に抑えるためには、鉄筋の芯かぶりで最低でも 52mm 確保することで十分な遮熱性を確保できることが判った。コンクリートの許容温度も 300℃とすると、RABT 曲線に相当する火災により火害を受けた場合は、深さ 52mm 以上のコンクリートを除去し、補修を行う必要がある。また、5 章の結果より、補修厚さは 50mm 程度確保すれば遮熱性を確保できることが判っており、火害を受けた場合でもかぶり厚さを増大させることなく補修が可能である。

表 6-4 コンクリートの品質試験および爆裂深さの測定結果

コンクリートの品質試験結果					耐火実験結果(爆裂深さ)		
スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	コンクリートの温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)		最大爆裂深さ (mm)	平均爆裂深さ (mm)	爆裂面積率 (%)
			材齢20時間	耐火実験時			
59.5	1.7	18	32.2	81.8	5	0.3	20.9

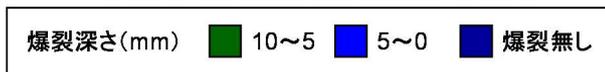
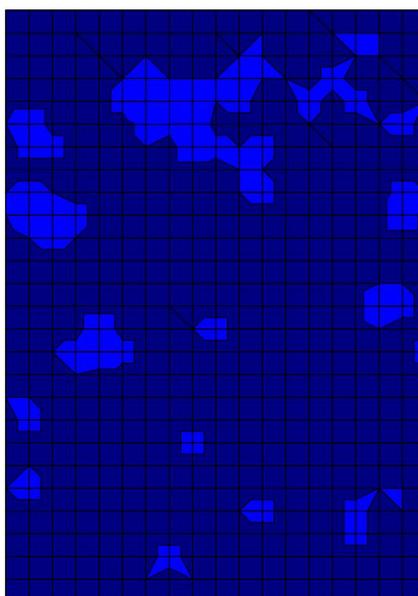


図 6-6 爆裂深さの分布図

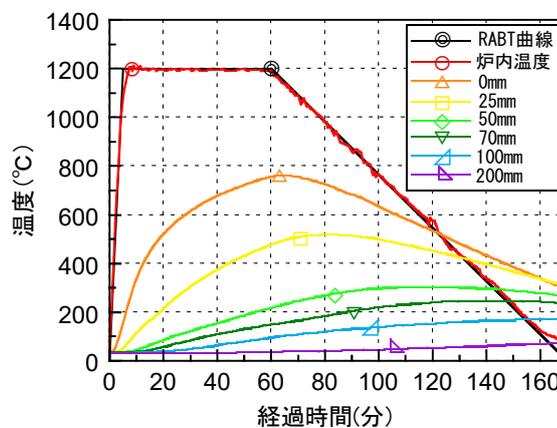


図 6-7 コンクリート内部の温度履歴

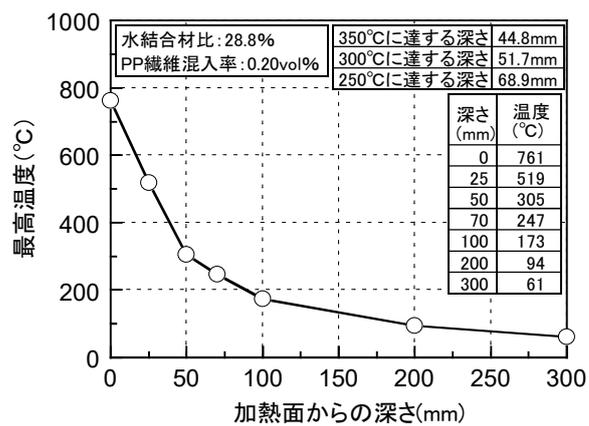


図 6-8 加熱面からの深さと最高温度の関係

6.3 現場打ちコンクリートへの適用検討

6.3.1 シールドトンネルの拡幅部の概要と現場打ちコンクリートへの適用

都市部の地下に構築されるシールドトンネルは、シールド工法で構築されることが多いが、本線とランプの接続部などは、シールドマシンが通過した後にセグメントを切り開き、その拡幅部（以下、分合流拡幅部と呼称）を掘削した後、現場打ちにより覆工コンクリートを構築する必要がある⁵⁾。分合流拡幅部へのコンクリートの供給は、地上と地下のトンネルが繋がっている立坑部分から行う必要がある。そのため、プラントから現場までコンクリートを運搬し、地上部にて荷卸しを行った後、打込み場所まで、トンネル坑内を運搬させる必要があるが、現場内での運搬に手間と時間を要する。適用する耐火コンクリートは、スランプやスランプフローおよび空気量などコンクリートの品質の低下が懸念される。また、市中のプラントからコンクリートを出荷する場合、他の一般のコンクリートへの影響を考えるとプラントにてPP繊維を混入することは困難であることが多い。そのため、耐爆裂性を確保するためのPP繊維は、現地での混入が求められ、PP繊維の混入によるコンクリートの流動性や材料分離抵抗性の低下を考慮する必要がある。

そこで、現場までの運搬および現場内での運搬に伴うスランプやスランプフローおよび空気量の経時変化を把握するために、実際の施工条件を想定した施工実験を行った。また、6.2節と同様に、実規模の試験体を用いて、設計で考慮する圧縮応力を作用させた状態でのRABT曲線による耐火実験を行い、耐爆裂性や遮熱性の評価を行った。当然ながら、分合流拡幅部の覆工コンクリートにも、本線のセグメントと同様の耐火性を付与する必要がある。分合流拡幅部の覆工に用いる現場打ちコンクリートの種類を図6-9に示す。耐火コンクリートは、共用時に車両が走行する部分である床版より上部に適用される。覆工コンクリートの上部は閉塞部の打込みとなり、締固めが困難であることから高流動タイプとし、側部はスランプタイプを用いることとした。

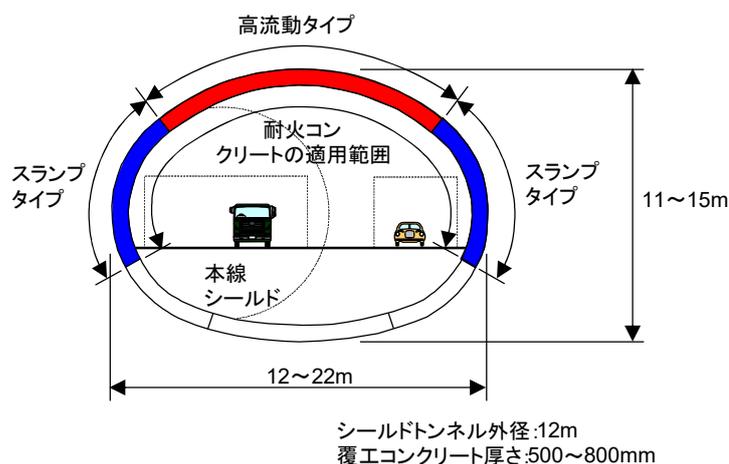


図 6-9 分合流拡幅部の覆工に用いる現場打ちコンクリートの種類

6.3.2 現場打ちコンクリートの要求性能および確認項目

分合流拡幅部に使用する耐火コンクリートについて、製造から打込みまでに想定される流れを図6-10に示す。PP繊維を混入する前のベースコンクリートをプラントから現場まで運搬し、地上にてベースコンクリートの荷卸しを行った後、立坑上から立坑下のトンネル坑内へ圧送し、トンネル坑内を専用のトラックアジテータにて運搬する。さらに、トンネル坑内の荷卸し場所にてPP繊維をトラックアジテータのドラム内に投入し、コンクリートを攪拌した後に、打込み場所まで圧送する必要がある。そこで、これらの条件を模擬した施工実験を行うこととした。分合流拡幅部に使用する耐火コンクリートにもセグメントと同様に、所要のフレッシュコンクリートや硬化コンクリートの品質、およびRABT曲線に耐えうる耐火性が求められる。耐火コンクリートの目標性能を表6-5に示す。また、耐火コンクリートを分合流拡幅部まで供給する際の各施工段階における目標品質を図6-11に示す。目標とする圧縮強度については、分合流拡幅部の覆工の設計基準強度を 40N/mm^2 と設定した。流動性については、トンネル坑内の打込み場所にて、PP繊維混入後のスランプおよびスランプフローを基準として設定した。スランプタイプについては目標スランプを 15cm とし、高流動タイプについては、実際の配筋条件を想定して自己充填性のランクを2とし、目標スランプフローは 62.5cm とした。PP繊維の混入により流動性が低下するため、PP繊維を混入する前のベースコンクリートについては、スランプタイプの目標スランプは 21cm とし、高流動タイプの目標スランプフローは 70cm とした。目標空気量は、PP繊維混入前と混入後で同一とし、高流動タイプは 2.0% 、スランプタイプは、 4.5% とした。

また、耐火性については、6.2節のセグメントと同様の性能を有することを確認することとし、RABT曲線による耐火実験により検証した。耐爆裂性については、最大爆裂深さを 10mm 未満に抑制することを目標とし、遮熱性については、鉄筋の温度が 300°C 以下となるようかぶりを確保することを目標とした³⁾。

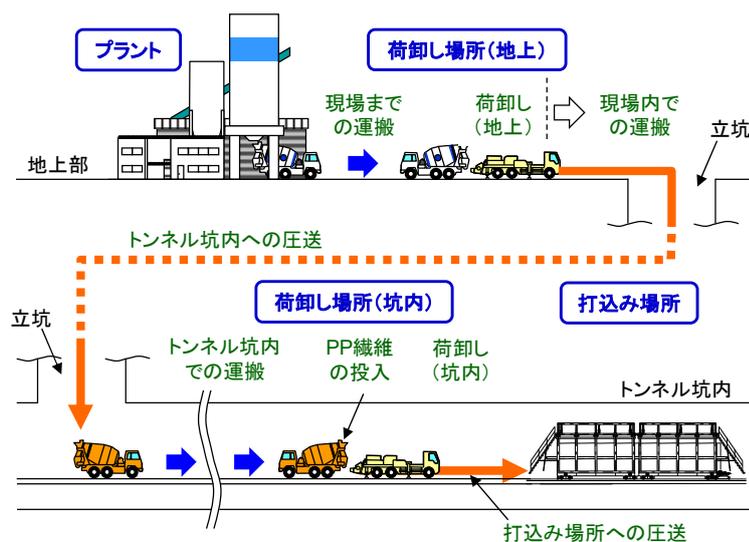


図 6-10 耐火コンクリートの製造から打込みまでの流れ

表 6-5 耐火コンクリートの目標性能

項目		準拠規格	目標値
スランプタイプ	スランプ	JIS A 1101	(荷卸し時) 21±1.5cm (PP繊維混入後) 15±2.5cm
	空気量	JIS A 1128	(荷卸し時) 4.5±2.5% (PP繊維混入後) 4.5±2.5%
高流動タイプ	スランプフロー	JIS A 1150	(荷卸し時) 70±5cm (PP繊維混入後) 62.5±7.5cm
	空気量	JSCE-F 513	(荷卸し時) 2.0±1.5% (PP繊維混入後) 2.0±1.5%
	充填高さ	JSCE-F 511	(PP繊維混入後) 300mm以上(ランク2:障害R2)
圧縮強度		JIS A 1108	(材齢56日)40N/mm ² 以上
耐爆裂性		RABT曲線による耐火実験	最大爆裂深さが10mm未満
遮熱性			鉄筋の温度が300°C以下

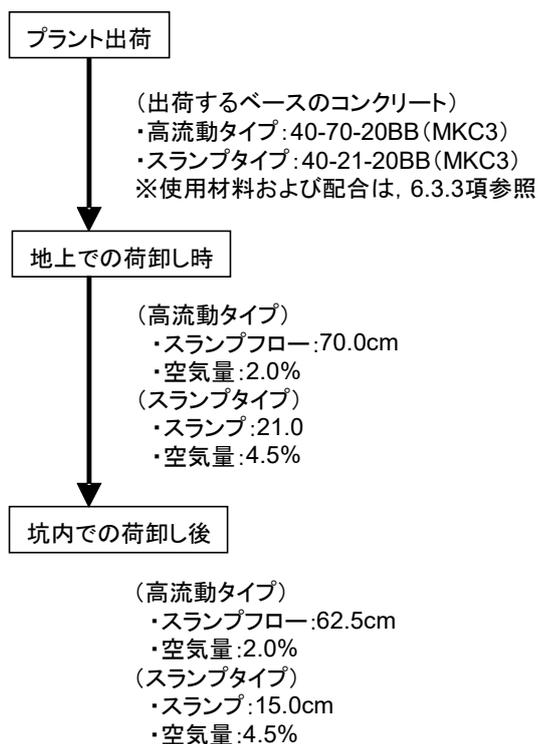


図 6-11 各施工段階における目標品質の設定

6.3.3 使用材料、配合および製造

コンクリートの使用材料を表 6-6 に示す。また、コンクリートの配合を表 6-7 に示す。

現場打ちのコンクリートの場合、先行して打ち込んだ既設のコンクリートに拘束されるため、水和熱に起因した温度応力や収縮によりひび割れが発生しやすい。そのため、セメントには、低発熱・収縮抑制型の高炉セメント B 種を使用することとした。また、できるだけ単位水量および単位セメント量を低減することが望ましい。土木学会のコンクリート標準示方書（以下、示方書と呼称）には単位水量の上限は $175\text{kg}/\text{m}^3$ を標準とする旨記載されている⁶⁾。そのため、設計基準強度を $40\text{N}/\text{mm}^2$ とし、3 章の結果より最も爆裂の抑制に最適な PP 繊維は繊維度 $2.2\text{dtex} \times$ 長さ 10mm でアスペクト比 570 の繊維であるが、単位水量の増加量をできるだけ低減するために、繊維度 $17\text{dtex} \times$ 長さ 20mm でアスペクト比 410 の繊維を使用することとし、繊維の混入率は $0.1\text{vol.}\%$ とした。

4 章の結果より、アスペクト比 410 の PP 繊維を $0.1\text{vol.}\%$ 混入する場合、単位水量をスランプタイプは $8\text{kg}/\text{m}^3$ 、高流動タイプは $28\text{kg}/\text{m}^3$ 程度増加する必要がある。しかし、単位水量をできるだけ低減し、 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とするために、混和剤の添加量の増加によって流動性を向上させることとした。スランプタイプについては、単位水量 $8\text{kg}/\text{m}^3$ の増加分はスランプ 4cm 程度の増加に相当する。そこでベースコンクリートの目標スランプは 21cm とした。また、高流動タイプについては、4 章の図 4-11 によると、単位水量 $28\text{kg}/\text{m}^3$ 分は混和剤添加量の 3 割増しに相当するため、混和剤添加量を 3 割増しすることで、流動性の向上を図ることとし、ベースコンクリートの目標スランプフローは 70cm とした。

さらに、材料分離抵抗性を確保するために、ベースコンクリートよりスランプタイプは $14\text{L}/\text{m}^3$ 、高流動タイプは $44\text{L}/\text{m}^3$ の単位粗骨材絶対容積を低減する必要がある。日本建築学会の建築工事標準仕様書 JASS5 には、スランプ 15cm に対する単位粗骨材かさ容積の目安が記載されており、スランプ 15cm に相当する単位かさ容積は $0.66\text{m}^3/\text{m}^3$ であり、実積率から単位粗骨材絶対容積は $396\text{L}/\text{m}^3$ が目安となる⁷⁾。しかし、PP 繊維の混入により $14\text{L}/\text{m}^3$ 低減すると $382\text{L}/\text{m}^3$ となる。示方書では、単位水量 $175\text{kg}/\text{m}^3$ に相当する細骨材率の目安は 44% であり⁶⁾、単位粗骨材絶対容積が $382\text{L}/\text{m}^3$ では、細骨材率が 40% 程度まで低下してしまう。そのため、スランプタイプについては、余裕を考慮して細骨材率を 44% とした。また、高流動タイプについては、4 章の結果から単位粗骨材絶対容積の上限値が $350\text{L}/\text{m}^3$ である。また、土木学会の高流動コンクリートの配合設計・施工指針には、ランク 2 に相当する単位粗骨材絶対容積は $330\text{L}/\text{m}^3$ と記載されている⁸⁾。したがって、単位粗骨材絶対容積を $44\text{L}/\text{m}^3$ 低減すると粗骨材の絶対容積は $286\sim 306\text{L}/\text{m}^3$ とが望ましいと考える。そのため、単位粗骨材絶対容積は $290\text{L}/\text{m}^3$ と設定した。

コンクリートは市中のプラントにて製造を行った。公称容量 3.3m^3 の二軸強制練りミキサを使用し、1 バッチの練混ぜ量は 2m^3 とした。プラントにてベースコンクリートの練混ぜを行った後、トラックアジテータに移し替え、所要のタイミングで PP 繊維の投入を行った。投入後 2 分間の高速攪拌を行い、PP 繊維を分散させ、耐火コンクリートを製造した。

表 6-6 使用材料

種類	記号	各材料の種類および物性
練混ぜ水	W	水道水
セメント	C	高炉セメントB種（低発熱・収縮抑制型），密度 2.98g/cm^3
細骨材	S	砂，密度 2.61g/cm^3 ，粗粒率2.70
粗骨材	G	碎石，密度 2.62g/cm^3 ，実積率60.0%
減水剤	WR	リグニンスルホン酸塩，オキシカルボン酸塩およびポリカルボン酸系AE減水剤（高機能タイプ）
	SP	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤
短繊維	PP	PP繊維，密度 0.91g/cm^3 ，織度17dtex×長さ20mm（アスペクト比410）

表 6-7 配合

コンクリートの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				WR (kg/m^3)	SP (kg/m^3)	PP (kg/m^3)
			W	C	S	G			
スランプタイプ	39.6	44.0	172	434	733	935	5.21	—	0.91
高流動タイプ	35.0	54.5	175	500	906	760	—	6.50	0.91

6.3.4 施工性の検証

(1) 実験概要

施工性を検証するために、現場での施工を模擬した施工実験を行った。施工実験の概要を図6-12に示す。実験では、現場までの運搬および現場内での運搬に伴うコンクリートの品質の変化を確認するために、以下のとおり、各施工段階で品質を確認できるよう工夫した。配管距離は、実際の現場での配管を想定して設定した。トンネル坑内への圧送および打込み場所への圧送については、両者とも水平換算距離を同程度と設定した。2回の圧送は同じ配管を使用することとし、水平換算距離で90mの配管とした。

- ① 現場までの運搬
- ② 荷卸し（地上）
- ③ トンネル坑内への圧送（1回目の圧送）
- ④ トンネル坑内での運搬
- ⑤ PP繊維の混入・荷卸し（坑内）
- ⑥ 打込み場所への圧送（2回目の圧送）

各施工段階でのコンクリートの品質を確認するために、スランプやスランプフローおよび空気量を測定した。また、高流動タイプについては、PP繊維を混入した後にU型容器を用いた充填試験を行い、ランク2相当の間隙通過性を有することを確認した。さらに、耐火コンクリートの圧送前後でのPP繊維の分散性を確認するために、トラックアジテータのドラム内および2回目の圧送後のホースの筒先から耐火コンクリートを採取し、それぞれPP繊維の混入率試験を併せて実施した。

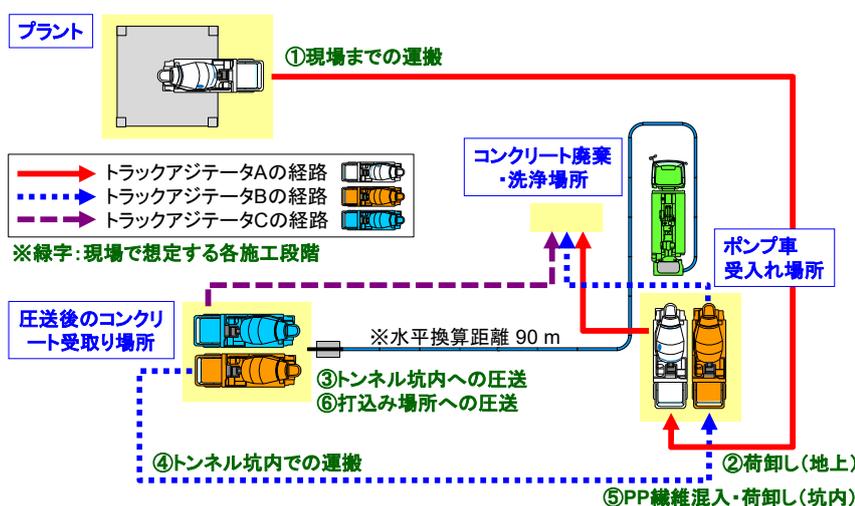


図 6-12 施工実験の概要

(2) 実験結果および考察

コンクリートの品質試験の結果を表 6-8 に示す。各施工段階におけるスランプおよびスランプフローの経時変化を図 6-13 および図 6-14 に示す。空気量の経時変化を図 6-15 および図 6-16 に示す。また、施工実験の状況を写真 6-1 に示す。PP 繊維の混入により、スランプタイプはスランプが 4.5 cm、高流動タイプはスランプフローが 14.5 cm 低下したが、2 回目の圧送後も目標とした品質を十分確保できた。空気量は、PP 繊維の混入により増加する傾向にあるが、概ね目標値程度に制御することができた。繊維混入率のばらつきは 4%程度であり、繊維の分散性は良好であると判断できる。圧縮強度についても、材齢 56 日の段階で設計基準強度を十分満足する結果であった。運搬に手間と時間を要する分合流拡幅部への耐火コンクリートの供給において、目標とした所要の品質を確保でき、配管の閉塞や PP 繊維のファイバーボールも認められなかった。各種試験においても、良好な結果が得られたことから、実際の現場においても、施工は十分可能であると判断した。

施工実験の結果から、トンネル坑内での荷卸し時は、経時変化、圧送および PP 繊維の混入によって、想定したとおりスランプおよびスランプフローが低下することが確認された。そのため、PP 繊維の混入による流動性の低下量を考慮し、地上での荷卸し時とトンネル坑内で PP 繊維を混入した後の荷卸し時で品質の目標値を変えることで実際の現場での品質管理が可能となる。空気量については、大きな変動は認められなかったため、荷卸し場所ごとの目標値は同じ値で良いと考えられる。実際の施工にあたっては、コンクリートの品質は、現場内での運搬に要する時間によって大きく左右される。そのため、生コンプラント、地上での現場受入れ場所および PP 繊維を添加する圧送場所で、トラックアジテータの運搬状況やコンクリートの数量など、施工状況に応じて密に連絡を取り合い、トラブル等が発生した場合に柔軟に出荷間隔の調整が行えるよう、品質管理体制に重点をおく必要がある。

表 6-8 品質試験結果

コンクリートの種類	想定する施工段階	練上りからの経過時間 (分)	スランプおよびスランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	充填高さ (mm)	PP繊維の混入率 (%)	圧縮強度 (56日) (N/mm ²)
スランプタイプ	プラント出荷時	5	21.0	3.6	22	—	—	—
	荷卸し(地上)時	30	21.5	3.6	22	—	—	—
	トンネル坑内への圧送後	47	21.5	3.7	24	—	—	—
	トンネル坑内での運搬後	87	19.5	4.6	24	—	—	—
	PP繊維混入・荷卸し(坑内)後	97	15.0	5.0	24	—	0.104	47.8
	打込み場所への圧送後	112	13.5	4.7	26	—	0.104	50.5
高流動タイプ	プラント出荷時	5	61.0	2.0	23	—	—	—
	荷卸し(地上)時	30	68.5	1.7	23	—	—	—
	トンネル坑内への圧送後	49	70.5	1.4	24	—	—	—
	トンネル坑内での運搬後	87	70.0	1.8	24	—	—	—
	PP繊維混入・荷卸し(坑内)後	96	55.5	2.4	24	348	0.096	67.8
	打込み場所への圧送後	114	56.0	1.7	25	327	0.099	70.0

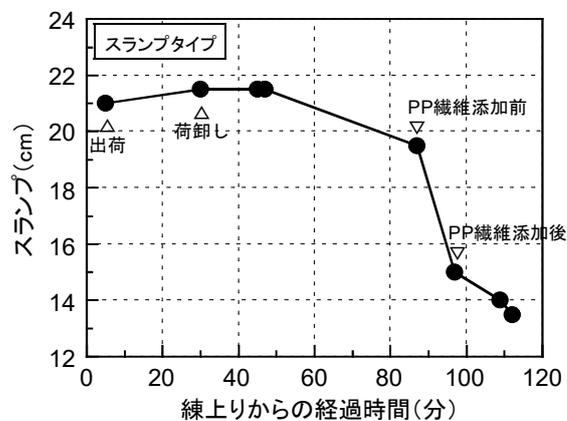


図 6-13 スランプの経時変化 (スランプタイプ)

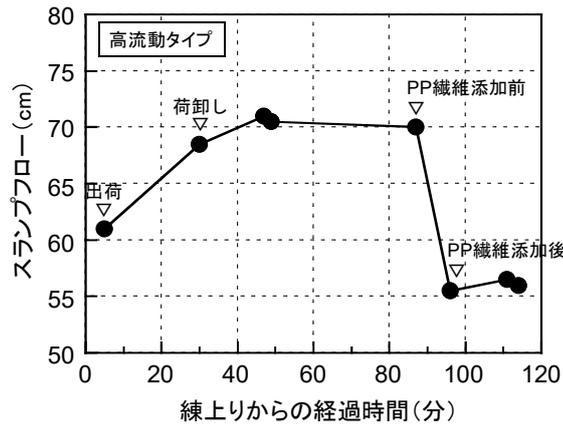


図 6-14 スランプフローの経時変化 (高流動タイプ)

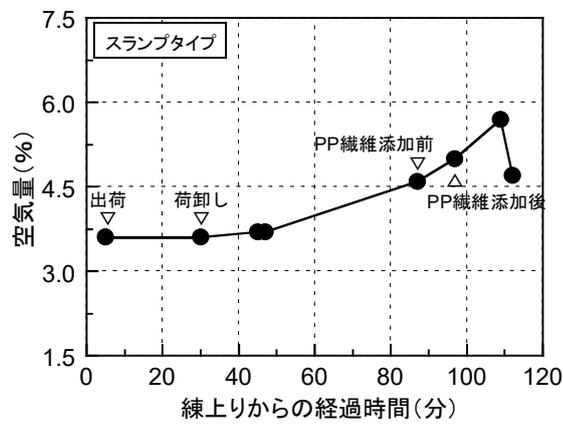


図 6-15 空気量の経時変化 (スランプタイプ)

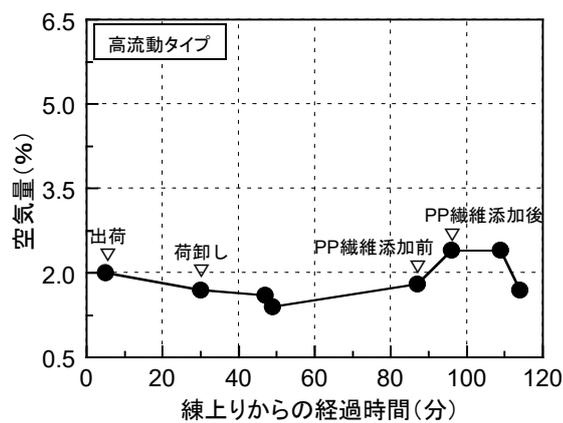


図 6-16 空気量の経時変化 (高流動タイプ)



写真 6-1 施工実験の状況

6.3.5 耐火性の検証

(1) 実験概要

耐火実験に用いた試験体の寸法は、実際の覆工コンクリートを想定して、幅 1700 mm×長さ 1900 mm×厚さ 500 mm とした。実際の施工を想定して、主鉄筋には D25 を使用し、芯かぶりは 130 mm とした。断面内には 14 本の PC 鋼棒を配置し、設計で考慮する 14 N/mm² の圧縮応力を作用させながら耐火実験を実施した。試験体の概要を図 6-17 に示す。スランプタイプと高流動タイプの 2 種類の配合のうち、水セメント比が小さい方が爆裂に対して厳しい条件となることから、耐火実験は高流動タイプについて行い、耐火性の検証を行った。試験体を作製後屋内にて保管し、材齢 68 日で耐火実験を実施した。

耐火実験の概要を図 6-18 に示す。加熱曲線には、3 章および 6.2 節の実験と同様に、トンネル火災を想定した RABT 曲線を使用した。耐爆裂性を確認するために、耐火実験後に試験体を取り出し、爆裂深さの測定を行った。爆裂深さは、試験体表面を 50mm 間隔に分割して、ノギスにより測定した。また、遮熱性を確認するために、試験体内部に熱電対を埋め込み、コンクリートの温度履歴を測定した。熱電対の設置位置は、加熱面から 0, 25, 50, 75, 100, 200, 300 および 500 mm の位置とした。

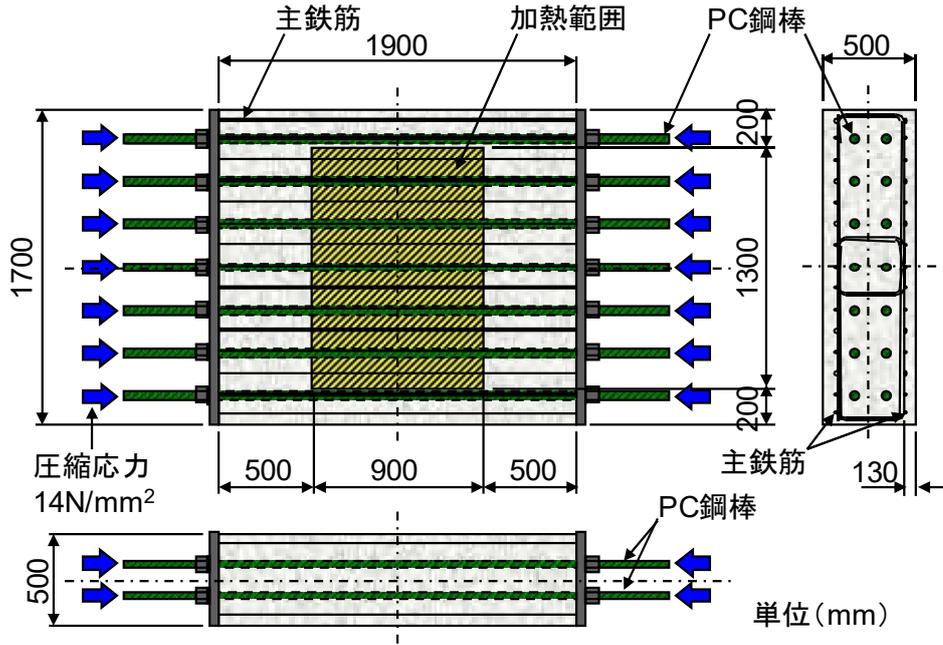


図 6-17 試験体の概要

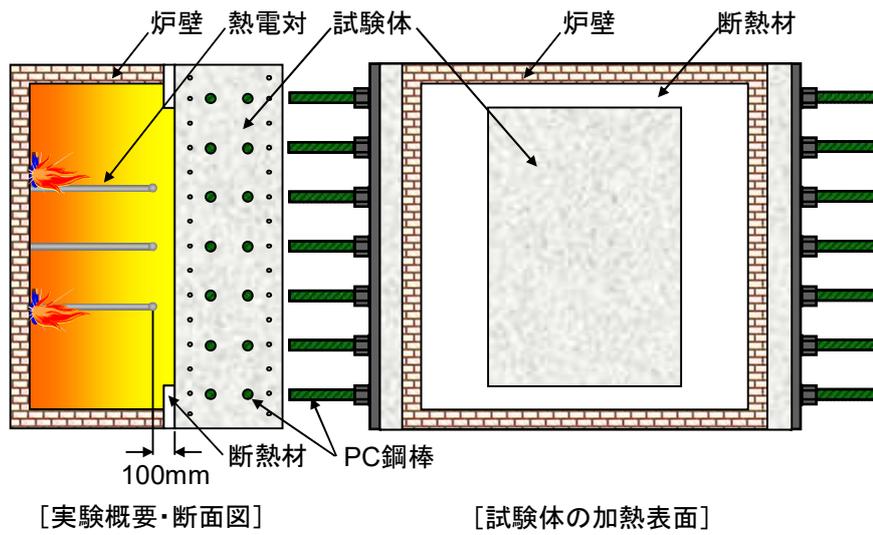


図 6-18 耐火実験の概要

(2) 実験結果および考察

爆裂深さの分布図を図 6-19 に示す。表層部において数か所の剥離が確認されたが、大きな爆裂は生じておらず、爆裂深さも最大 4 mm 程度の軽微なものであった。4 章の結果より、水結合材比 35% で PP 繊維の混入率が 0.10vol.% の場合、最大爆裂深さは 13mm であったが、今回は単位水量が少ないこともあり、爆裂深さが小さく抑えられたものと思われる。

加熱面からの深さごとの温度履歴を図 6-20 に示す。また、加熱面からの深さと最高温度の関係を図 6-21 に示す。今回の実験では、構造上鉄筋の芯かぶりを 130mm としたが、鉄筋の最高温度は 120℃であり、十分な遮熱性を有する結果となった。鉄筋の温度はコンクリートの温度に支配されると考えられるため、鉄筋の許容温度を 300℃と仮定すると、300℃に達する深さは 52mm であり、鉄筋の芯かぶりを最低 52mm 程度確保すればよいことが判った。6.2 節のセグメントと同等の値となった。

表 6-9 爆裂深さの測定結果

最大爆裂深さ (mm)	平均爆裂深さ (mm)	爆裂面積率 (%)
4	0.04	1.4

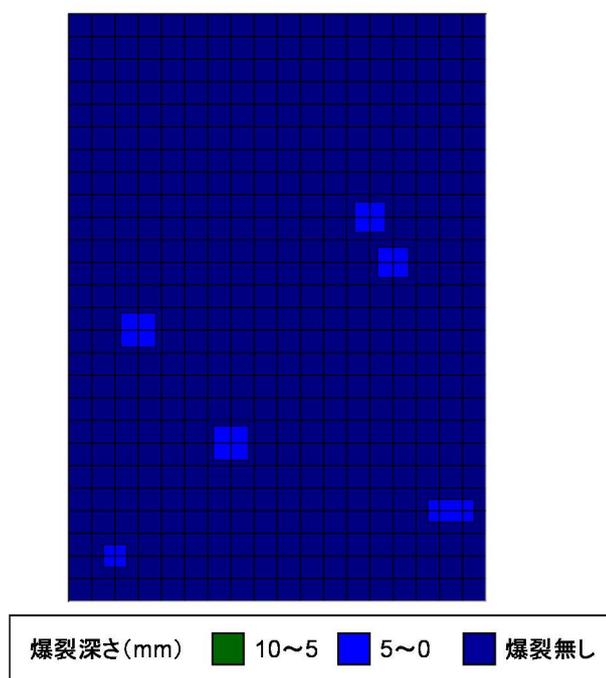


図 6-19 爆裂深さの分布図

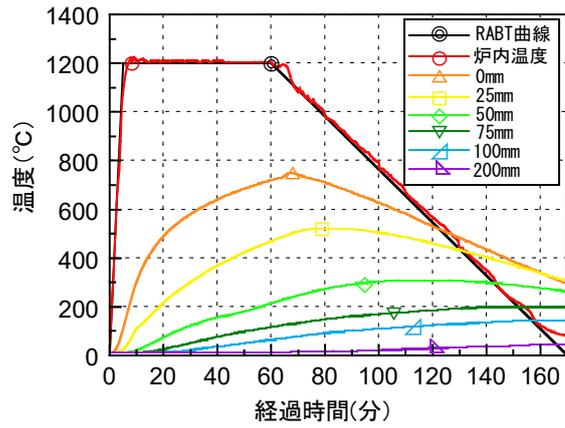


図 6-20 温度履歴

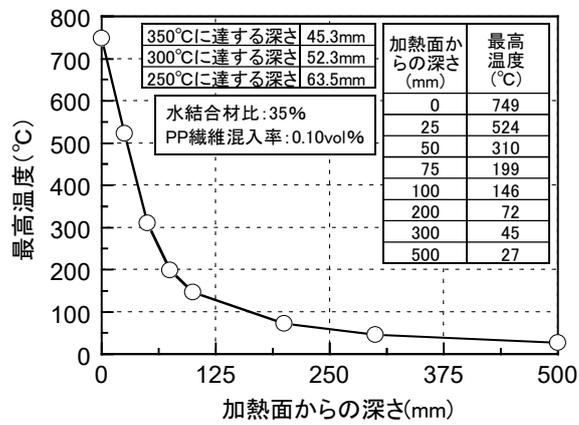


図 6-21 加熱面からの深さと最高温度の関係

6.4 まとめ

シールドトンネルの覆工への耐火工構築技術を確立するために、セグメントおよび現場打ちコンクリートの2種類を対象に耐火性や施工性の確認を行った。実際の覆工を模擬した実規模の試験体を用いて、設計で考慮する圧縮応力を導入した状態でのRABT曲線による耐火実験を行い、耐爆裂性を確保するためのPP繊維の種類および混入量と、遮熱性を確保するためのかぶりについて検証を行った。また、現場打ちコンクリートについては、コンクリートの運搬やPP繊維の混入によりコンクリートの品質の低下が懸念されるため、施工条件を模擬した施工実験を行い、コンクリートの品質の経時変化や施工性について検証を行った。その結果、シールドトンネルの覆工におけるRABT曲線による加熱に耐えうる耐火工の構築技術を提案した。

本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 設計基準強度 48N/mm^2 以下のセグメントに対して、鋼繊維を $0.60\text{vol.}\%$ 混入した鋼繊維補強高流動コンクリートに繊維度 2.2dtex × 長さ 10mm のPP繊維を $0.20\text{vol.}\%$ 混入することで、耐爆裂性を有する耐火工の構築が可能であることを検証した。
- (2) 設計基準強度 40N/mm^2 以下の現場打ちコンクリートに対して、スランプタイプおよび高流動タイプに繊維度 17dtex × 長さ 20mm のPP繊維を $0.10\text{vol.}\%$ 混入することで、耐爆裂性を有する耐火工の構築が可能であることを検証した。
- (3) 実際の覆工を想定した幅 1700 × 長さ 1900 × 厚さ 500mm の実規模の試験体に、圧縮応力を 14N/mm^2 作用させた状態でRABT曲線による耐火実験を行った結果、幅 500 × 長さ 1000 × 厚さ 200mm の小型の試験体で圧縮応力を作用させていない場合の実験結果と比べて、爆裂の程度に顕著な差異は認められなかった。耐爆裂性については、小型の試験体でも評価が可能であると考えられる。
- (4) セグメント向けと現場打ちコンクリート向けのいずれの耐火コンクリートにおいても、RABT曲線による加熱履歴を受ける場合、鉄筋の許容温度を 300°C と仮定すると、許容温度に達する深さは 52mm であり、鉄筋の芯かぶりを最低 60mm 程度確保することで、十分な遮熱性を確保できることを検証した。
- (5) 現場打ちコンクリートに耐火性を付与する場合、打込み場所でのPP繊維の混入が求められる場合がある。ベースコンクリートおよびPP繊維を混入後の耐火コンクリートともに、流動性や材料分離抵抗性など所要の品質を満足することを確認する必要がある。プラントから出荷するベースコンクリートのスランプやスランプフローを増加することで、耐火コンクリートの供給が可能であることを検証した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2017
- 2) 堀誠行，大関宗孝，大塚孝義，神田亨：RCセグメントの高温時の特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1725-1730，2002
- 3) 首都高速道路株式会社：トンネル構造物設計要領（シールド工法編），第3編 耐火設計，pp.1-27，2008
- 4) 土橋浩，松原健太，屋代勉，小林一博：鋼繊維補強高流動コンクリート（SFRC）セグメントの現場適用，コンクリート工学，Vol.44，No.11，pp.45-50，2006
- 5) 津野和宏，落合栄司，川田成彦，藤井剛，高浜達矢：民間下に道路トンネル分合流部を構築するための技術的対策，トンネル工学報告集，Vol.22，pp.447-454，2012
- 6) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2017
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2018，2018
- 8) 土木学会：高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012年版]，コンクリートライブラリー136，2012

第7章 結論

7.1 本研究の結論

都市部の地下に構築されるシールドトンネルでは、車両火災に備えた安全性に焦点が当てられている。可燃物を満載した車両による火災事故が発生すると、閉鎖された空間で可燃物が燃焼し、トンネル坑内の温度は急速に1000°C以上まで上昇する可能性が高い。このような高温下に覆工コンクリートが晒された場合、爆裂を生じたり、強度低下を引き起こすため、甚大な被害を招くことになりかねない。そのため、覆工コンクリートには耐火性の付与が求められている。覆工コンクリートを火害から保護するために表面に耐火被覆を施す対策も考えられるが、近年ではPP繊維の混入により、覆工コンクリート自体に耐火性を付与する対策が取られるようになってきている。トンネル火災を想定したRABT曲線による耐火実験が実施され、発注機関や学協会などで耐火工の種類、要求性能、耐火性の検証方法および維持管理の考え方について規準や指針類で取りまとめられているが、具体的な使用材料、配合、補修材料については示されておらず、体系的な知見は得られていない。

そこで、本研究では、具体的な耐火工の構築技術の確立を目的として検討を行った。耐爆裂性を確保するための最適なPP繊維の選定を行い、爆裂を制御するために水結合材比に応じたPP繊維の混入量について定量的に示した。耐爆裂性を確保するためには直径が小さく、アスペクト比の大きいPP繊維が必要であり、PP繊維の混入により流動性および材料分離抵抗性が大きく低下するため、PP繊維を混入する場合の配合の修正方法について提案した。また、RABT曲線による加熱を受けた場合、覆工コンクリートは強度低下を招くため、加熱により劣化した部位を除去し、繰返しの火災に備えて耐火性を有する材料にて補修する必要がある。そのため、劣化部位の簡易な調査方法、劣化部の除去工法および吹付けや左官による補修技術について提案した。これらの知見を用いて、シールドトンネルの覆工コンクリートにおける耐火工の構築に向けて、PP繊維を混入した鋼繊維補強高流動コンクリートを用いた耐火性を有するセグメントおよび現場打ちの耐火コンクリートを提案し、その耐爆裂性や遮熱性について検証した。

各章で得られた知見を以下に整理し、本研究の結論とする。

【第2章 既往の研究】

シールドトンネルの覆工コンクリートの耐火工構築に向けて、これまでの規準および指針類の変遷、シールドトンネルの火害対策、有機繊維による耐爆裂性の確保技術、繊維補強コンクリートの配合設計および火害を受けたコンクリートの補修技術について、技術の変遷や既往の研究成果の整理を行った。そして、耐火工の具体的な構築方法の提案に必要な課題を抽出するとともに、研究の位置づけを明確にした。

- (1) 土木分野においては、シールドトンネルの車両火災に対する安全性に関するさまざまな研究が進められている。2000年代に入ってシールドトンネルは、耐火工として覆工コンクリートの表面に耐火被覆を施すことにより安全性を確保してきたが、近年では覆工コンクリート自体に耐火性を付与する技術に変わってきた。

- (2) コンクリート構造物における耐火技術に関して、学協会や発注機関にて、その研究成果を取りまとめた規準や指針類の整備が進められているが、耐火コンクリートの具体的な使用材料、配合については示されていない。
- (3) シールドトンネルの車両火災に対する耐火性の照査を行うために、実規模の耐火実験による検証が行われている。国内では、加熱曲線にトンネル火災を想定した最大温度 1200℃を 60 分まで保持する RABT 曲線が使用されることが多い。
- (4) 爆裂のメカニズムに関する研究が進められ、爆裂は水蒸気圧説と熱応力説の複合作用によって発生することが次第に明らかとなりつつある。国内のシールドトンネルにおける耐爆裂性を確保する対策として、有機繊維の混入が主流となっているが、RABT 曲線による加熱を受ける場合の繊維の形状や混入率に対して、体系的な見解は得られていない。
- (5) 爆裂の抑制に用いられる有機繊維には、直径が小さく、アスペクト比の大きい繊維が用いられる。従来の曲げ靱性の改善や剥落防止対策に用いられる、太くて長い繊維を用いる場合の配合設計手法に関する研究は多くなされており、定量的な方法も指針に規定されているが、爆裂の抑制対策に用いるような細長い繊維を用いる場合の配合設計手法は確立されていない。
- (6) 火害を受けたコンクリート部材の劣化の程度を測定する方法として、さまざまな方法が提案されているが、大まかな劣化範囲は推定できるが劣化深さの推定が困難であったり、特殊な解析技術や専門知識が必要であるなど、それぞれに課題がある。手間がかからず、短期間のうちに効率よく簡易に劣化範囲を推定できる技術が求められている。
- (7) コンクリート構造物の劣化部の補修方法として、ポリマーセメントモルタルが使用されることが多いが、汎用の材料は爆裂に対する抵抗性に劣ることが指摘されている。都市部の地下に構築されるシールドトンネルの補修においては、高強度でかつ RABT 曲線による加熱履歴に対する耐爆裂性を確保することが求められるが、研究事例は少なく、具体的な使用材料や配合に関する知見は少ない。

【第3章 耐爆裂性の確保技術】

覆工コンクリート自体に耐火性を付与することを目的として、PP 繊維の混入による耐爆裂性を確保する技術の検討を行った。覆工コンクリートを模擬した平板試験体を用いて RABT 曲線による耐火実験を行い、爆裂の抑制効果の確認を行った。また、使用材料や配合の違いが爆裂に及ぼす影響を確認し、爆裂の抑制に必要な PP 繊維の形状や混入率を定量的に示した。

- (1) RABT 曲線を用いた加熱による爆裂は、加熱初期の 10 分間に発生し、断続的に試験体全面にわたって平均的に発生する。最大爆裂深さ、平均爆裂深さおよび爆裂面積率の間には相関関係が認められる。
- (2) PP 繊維のアスペクト比の増加に伴い、爆裂深さは低減する。特に、水結合材比が 28.8%以上の範囲においては、繊維度 17dtex×長さ 20mm および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm (アスペクト比が 410~570) の PP 繊維が爆裂の抑制に効果的である。
- (3) 繊維度の低下に伴い、爆裂深さが抑制されるが、繊維の長さが 2mm と短い場合、爆裂深さが大きくなり、爆裂深さは必ずしも繊維の表面積で整理はできない。アスペクト比の大き

い繊維度 17dtex×長さ 20mm および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を用いる場合には、繊維の表面積と爆裂深さの間に相関関係が認められる。

- (4) 水結合材比の低下に伴い、爆裂深さは増加するが、所要の PP 繊維を混入することで、爆裂深さを低減できる。アスペクト比の大きい繊維度 17dtex×長さ 20mm および繊維度 2.2dtex×長さ 10mm の PP 繊維を用いる場合、爆裂深さは結合材水比と PP 繊維の混入量によって整理することができ、爆裂の制御が可能である。水結合材比が 28.8%以上の範囲においては、繊維を最大で 0.3vol.%混入することで爆裂の抑制が可能である。

【第4章 耐火コンクリートにおける配合の修正方法】

耐爆裂性の確保に最適な直径が小さく、アスペクト比の大きい PP 繊維を用いる場合、コンクリートの流動性や材料分離抵抗性が低下するため、単位水量や単位粗骨材絶対容積の調整が必要である。繊維度 17dtex×長さ 20mm でアスペクト比 410 と、繊維度 2.2dtex×長さ 10mm でアスペクト比 570 の 2 種類の PP 繊維を 0.3vol.%まで混入した耐火コンクリートについて試し練りを行い、PP 繊維の形状および混入率が流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。PP 繊維を混入する場合に、所要の流動性および材料分離抵抗性を確保するための、ベースコンクリートの配合の修正方法を提案した。

- (1) PP 繊維の混入率の増加に伴い、流動性が低下する。PP 繊維の混入率が同一であれば、PP 繊維のアスペクト比が大きい方が流動性の低下量も大きい。
- (2) 所要の流動性を確保するには、PP 繊維の混入率の増加に比例して、単位水量の増加が必要となる。その増加量は、繊維のアスペクト比が大きいほど増加する。
- (3) 所要の流動性を保持しながら、材料分離抵抗性を確保するには、PP 繊維の混入率の増加に伴い、単位粗骨材絶対容積の低減が必要である。その低減量は、繊維のアスペクト比が大きいほど増加する。
- (4) PP 繊維の混入に伴う単位水量の増加量や単位粗骨材絶対容積の低減量は、スランプタイプよりも高流動タイプの方が大きい。

【第5章 火害を受けた覆工コンクリートの補修技術】

シールドトンネルにおける覆工コンクリートが火害を受ける場合に備えて、劣化範囲の簡易な調査方法、劣化部の除去方法および補修方法について検討を行った。火害を受けた覆工コンクリートに対して、RABT 曲線による加熱に耐えうる補修技術を提案した。

- (1) RABT 曲線による加熱を受けたコンクリートより採取したコアを半割に切断した供試体を用いて、エコーチップ硬さ試験機により反発硬度を測定することで、簡易に劣化深さを推定できる。採取したコアより測定した圧縮強度や耐火実験の温度データから推定した圧縮強度の分布と同様な傾向を得ることができ、測定方法の妥当性を確認した。
- (2) ウォータージェットを用いて、水圧やコンクリート表面から研り装置の先端までの離隔距離を調節することで、加熱により劣化した部分のみを除去できることを確認した。
- (3) 酢酸ビニル・アクリル系の共重合樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を結合材の 5%添加し、繊維度 17dtex×長さ 10mm の PP 繊維を 0.5vol.%混入したポリマーセメントモルタル

を用いることで、RABT 曲線に耐えうる耐火性を有する吹付け補修が可能であることを確認した。

- (4) アクリル系の樹脂を主成分とした再乳化形粉末樹脂を結合材の 1.3%添加し、繊度 2.2dtex ×長さ 10mm の PP 繊維を 0.5vol.%混入したポリマーセメントモルタルを用いることで、RABT 曲線に耐えうる耐火性を有する左官補修が可能であることを確認した。

【第6章 覆工への耐火工構築技術の適用検討】

シールドトンネルの覆工への耐火工構築技術を確立するために、セグメントおよび現場打ちコンクリートの2種類を対象に耐火性や施工性の確認を行った。実際の覆工を模擬した実規模の試験体を用いて、設計で考慮する圧縮応力を導入した状態での RABT 曲線による耐火実験を行い、耐爆裂性を確保するための PP 繊維の種類および混入量と、遮熱性を確保するためのかぶりについて検証を行った。また、現場打ちコンクリートについては、コンクリートの運搬や PP 繊維の混入によりコンクリートの品質の低下が懸念されるため、施工条件を模擬した施工実験を行い、コンクリートの品質の経時変化や施工性について検証を行った。シールドトンネルの覆工における RABT 曲線による加熱に耐えうる耐火工の構築技術を提案した。

- (1) 設計基準強度 48N/mm^2 以下のセグメントに対して、鋼繊維を 0.60vol.%混入した鋼繊維補強高流動コンクリートに繊度 2.2dtex ×長さ 10mm の PP 繊維を 0.20vol.%混入することで、耐爆裂性を有する耐火工の構築が可能であることを検証した。
- (2) 設計基準強度 40N/mm^2 以下の現場打ちコンクリートに対して、スランプタイプおよび高流動タイプに繊度 17dtex ×長さ 20mm の PP 繊維を 0.10vol.%混入することで、耐爆裂性を有する耐火工の構築が可能であることを検証した。
- (3) セグメント向けと現場打ちコンクリート向けのいずれの耐火コンクリートにおいても、RABT 曲線による加熱履歴を受ける場合、鉄筋の許容温度を 300°C と仮定すると、許容温度に達する深さは 52mm であり、鉄筋の芯かぶりを最低 60mm 程度確保することで、十分な遮熱性を確保できることを検証した。
- (4) 現場打ちコンクリートに耐火性を付与する場合、打込み場所での PP 繊維の混入が求められる場合がある。ベースコンクリートおよび PP 繊維を混入後の耐火コンクリートともに、流動性や材料分離抵抗性など所要の品質を満足することを確認する必要がある。プラントから出荷するベースコンクリートのスランプやスランプフローを増加することで、耐火コンクリートの供給が可能であることを検証した。

7.2 今後の課題

本研究では、シールドトンネルの覆工における耐火工の構築技術に関して、具体的な手法の提案を行った。耐火性を付与するための使用材料、配合および補修材料を明らかとし、最大温度1200℃のRABT曲線による加熱に耐えうるセグメントや現場打ちコンクリート向けの耐火コンクリートを確立した。しかし、現状のシールドトンネルで主に用いられている材料や配合をもとに耐火性の検討を行ったが、耐火性は骨材や混和材の種類によっても変わる可能性がある。今後さらにデータの蓄積を行い、基準や指針類に反映し、汎用化していく必要がある。

また、加熱条件として一般に用いられるRABT曲線を使用して研究を行ったが、車両の種類によっては加熱条件が異なるため、火害の程度が変わってくる。想定する火災の規模によって、維持管理に要するコストや期間が異なるため、加熱条件の違いが覆工コンクリートに与える影響や、火災の規模に応じた維持管理手法を整理する必要がある。

さらに、土木構造物には、シールドトンネル以外にも橋梁、鉄道高架橋および山岳トンネルなど構造物は多岐にわたる。これらの構造物にも火災の危険性は考えられるが、個々の火災に対する安全性については十分に検討されていないのが現状である。シールドトンネルとは構造形式、強度水準および火災の規模などが異なるため、対策工の種類、想定する加熱曲線、使用材料が変わってくる。今後は、本研究で得られた知見を参考に個別の対策方法を検討し、シールドトンネル以外の構造物へも展開していきたい。

謝辞

本論文は、広島大学大学院工学研究科博士課程後期社会基盤環境工学専攻の在学中において、得られた研究成果を取りまとめたものです。

本研究を取りまとめるにあたり、お忙しい中終始ご指導ご鞭撻を賜りました広島大学大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻 河合研至教授に深く感謝申し上げます。先生には、私が同工学部第四類や同大学院工学研究科博士課程前期構造工学専攻の学生であった頃よりコンクリート技術の基礎や研究の進め方など懇切丁寧にご教授いただきました。社会人となり株式会社大林組技術研究所にて在籍中に、博士論文を取りまとめる機会をいただき、誠にありがとうございました。ACT ジャーナルへの投稿においては、論文の執筆内容、原稿の査読、指摘事項に対する対応など親身に相談に乗っていただきました。心よりお礼申し上げます。

ご多忙の中、副査を快く引き受けていただき、本研究のご指導を賜りました広島大学大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻 半井健一郎教授、畠俊郎教授ならびに広島大学大学院工学研究科建築学専攻 大久保孝昭教授に深く感謝申し上げます。予備審査や公聴会では貴重なご指摘やご助言をいただき、論文の質を高めることができました。心よりお礼申し上げます。広島大学 米倉亜州夫名誉教授、佐藤良一名誉教授には、研究に対する姿勢や博士論文の在り方をご教授いただきました。公聴会の際には貴重なご意見をいただくとともに温かいお言葉をかけていただきました。心よりお礼申し上げます。広島大学大学院工学研究科社会基盤環境工学専攻 小川由布子助教、秘書 林美穂子氏ならびに構造材料工学研究室の皆様には、お忙しい中予備審査や公聴会の準備などいろいろとお手伝いをいただきました。また、大学訪問の際には、いつも明るく声をかけていただきました。心よりお礼申し上げます。

株式会社大林組技術研究所 勝俣英雄所長、山本彰副所長、時野谷浩良副所長には、厳しい社会環境にあり少ない人数での業務の遂行や生産性の向上が求められる中、本研究の実施および論文の執筆の機会をいただきました。心よりお礼申し上げます。同技術研究所に在籍しておられた松田隆副所長（現公益財団法人東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会）には、一般財団法人国土技術研究センターに出向中の頃より応援していただき、博士課程後期に入学する機会を与えていただきました。心よりお礼申し上げます。同技術研究所生産技術研究部 一瀬賢一部長には、既往の耐火技術や研究の進め方についてご指導いただきました。大学入学当初から叱咤激励と温かい励ましの言葉をかけていただき、挫折しそうな時でもモチベーションを維持することができました。心よりお礼申し上げます。同生産技術研究部に在籍しておられた入矢桂史郎部長（現本社安全品質管理本部品質管理室）には、耐火の研究に携わる機会を与えていただくとともに、ゼネコン研究者としての心構えや社会の厳しさをご指導いただきました。おかげで実際のシールドトンネル現場に適用することができました。心よりお礼申し上げます。

株式会社大林組技術研究所生産技術研究部 平田隆祥氏には、論文の構成や実験の方針など博士論文の取りまとめに際していろいろとご指導いただきました。また、年末年始のお忙しい中論文の査読をしていただき大変助かりました。心よりお礼申し上げます。同生産技術研究部 石関嘉一氏、西澤彩氏には、論文執筆にあたり、人数の少ないチームでいろいろと業務の調整をして

いただきました。長い論文執筆生活の中で、常に応援して下さったおかげで論文を完成させることができました。心よりお礼申し上げます。同生産技術研究部 近松竜一氏(2015年4月逝去)、石田知子氏、神代泰道氏、高橋晃一郎氏ならびに広島工業大学 竹田宜典教授には、研究を進める上で各種実験方法や課題の解決策に対する技術的なアドバイスをいただきました。おかげで実験を前に進めることができました。心よりお礼申し上げます。同生産技術研究部 吉田理紗氏ならびに片野啓三郎氏には、耐火実験に際していろいろとご協力いただきました。心よりお礼申し上げます。同技術研究所構造技術研究部 野村敏雄氏、田中浩一氏、武田篤史氏には、耐火実験時の断面力の導入方法や構造実験時の留意事項など、技術的なアドバイスをいただき、無事実験を遂行することができました。心よりお礼申し上げます。同構造技術研究部 丹羽博則氏、瀬川紘史氏には、火災工学実験棟において、耐火実験に関するノウハウをご指導いただくとともに、実験の工程調整や安全管理にご協力いただきました。いつも実験棟での懇親会にお声掛けいただき、楽しいひとときを過ごすことができました。心よりお礼申し上げます。

株式会社大林組技術研究所研究支援推進部 嶋英信氏には、火災工学実験棟ができて研究を始めた当初から大変お世話になりました。実験計画、工程や人工の調整、安全管理、実験の遂行など、いつも無理なお願いに笑顔で応じていただき、無事研究を完遂することができました。心よりお礼申し上げます。同技術研究所のコンクリート実験棟ならびにオープンラボ2の研究スタッフとして、永島明夫氏、山野義貞氏、谷原和義氏、小野敏昭氏、吉田将大氏、野上真氏、千葉隆氏、本田明弘氏、四十萬寛郎氏、杉本淳氏、潮田秀顕氏、日置匡氏、佐藤智宏氏、眞野宏之氏には、研究当初より実験を通じて多大な協力をいただきました。いつも明るく冗談交じりに声をかけていただき、研究生活を楽しく過ごすことができました。心よりお礼申し上げます。同技術研究所研究支援推進部 柿澤孝志氏ならびに当時在籍しておられた斉藤清隆氏(現有限会社天明工業)、桐山兼一氏(現東日本ロボティクスセンター)、中村裕太氏には、同技術研究所の火災工学実験棟において、試験体の移動や設置作業など耐火実験にご協力いただくとともに、実験方法に関していろいろと相談に乗っていただき、アイデアを出していただきました。心よりお礼申し上げます。火災工学実験棟の研究スタッフとして、構造計測株式会社 深井博之氏、伊達欣史氏、山九株式会社 江藤信行氏、橋本昌志氏、日本コンクリート技術株式会社 河野一徳氏、株式会社エスコ 村井正明氏、株式会社テクノサービス 上田弘顕氏、白井機材工業株式会社 早川一貴氏、日本工業検査株式会社 別府浩己氏、遠藤裕一郎氏には、火災工学実験棟での試験体の設置、PC 緊張、断熱材の取付けおよび計測機器の設置など、耐火実験において多岐にわたりご協力いただきました。心よりお礼申し上げます。株式会社越路工務店 平柳健一氏、有限会社天明工業 天明金吾氏、天明康雄氏には、技術研究所内の作業で繁忙の中、耐火実験に使用する試験体の鉄筋や型枠の組立および治具の作製にご協力いただきました。心よりお礼申し上げます。

株式会社大林組土木事業部営業第一部 屋代勉氏とは、当初から実験計画の立案、課題の解決、現場への適用など、ともに悩んで研究開発を進めてきました。火災工学実験棟、セグメント工場、生コンプラントなど、様々な場所で苦勞して実験に励んだ日々は、今となっては楽しい思い出です。大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。大学の先輩でもある生産技術本部シールド技術部 香川敦氏には、研究の推進や現場展開にあたり的確な助言をいただき、何度も助けられました。大学の入学時には英語論文を添削していただき、大変お世話になりました。心より

お礼申し上げます。同生産技術本部設計第一部 吉田公宏氏には、鋼繊維補強高流動セグメントの設計の考え方やシールド技術のノウハウに関してアドバイスをいただきました。論文執筆においては、いろいろとご指導いただきました。心よりお礼申し上げます。同生産技術本部シールド技術部に在籍しておられた田中善広氏（現七隈地下鉄JV工事事務所）には、実験計画の立案に関して親身に相談に乗っていただき、実験時には一緒になって研り深さや爆裂深さの計測にご協力いただきました。心よりお礼申し上げます。同生産技術本部リニューアル技術部 富井孝喜氏には、エコーチップピッコロを用いた劣化深さの測定実験や現場打ちコンクリートの試験練りにご協力いただきました。コンクリートの品質の観点からいろいろとご指摘をいただき大変勉強になりました。心よりお礼申し上げます。同生産技術本部技術第一部 谷田部勝博氏には、出向時に耐火セグメントの現場支援にご協力いただきました。心よりお礼申し上げます。安全品質管理本部安全管理室 木田平八氏ならびに当時生産技術本部シールド技術部に在籍しておられた三木慶造氏には、現場適用の場を与えていただき、発注者からのニーズに答えるためのスピード感と緊張感のある研究開発を、身をもって体験させていただきました。私の研究者としての人生の糧となっています。心よりお礼申し上げます。同生産技術本部シールド技術部に在籍しておられた北岡隆司氏（現土木本部）、木村勉氏（現外環北行シールドJV工事事務所）には、研究テーマの中で耐火に関していろいろと検討する機会をいただきました。研究の進め方や現場展開に際して、時には厳しく、時には優しくご指導いただきました。心よりお礼申し上げます。

当時URUP大井JV工事事務所に在籍しておられた河口琢哉氏、首都高新横浜JV工事事務所に在籍しておられた松原健太氏、藤井剛氏、近藤由也氏、林成卓氏、高浜達矢氏、西岡恭輔氏ならびにURUP川尻工事事務所に在籍しておられた大井和憲氏、蛭子延彦氏、前田知就氏には、耐火工の現場適用の機会を与えていただくとともに、多大なご支援とご協力をいただきました。耐火実験やセグメント製造の際には現場の観点からご指導いただきました。心よりお礼申し上げます。

株式会社IHI 建材工業 小林一博氏には、耐火実験用の試験体の作製、セグメント工場での耐火コンクリートの製造検討など、耐火実験や実際のセグメントへの適用にあたり多大なご協力をいただきました。困難な課題にも真摯に向き合ってください、大変助けられました。心よりお礼申し上げます。橋本博英氏、増田宏氏ならびに株式会社IHI トレーディング 清宮誉志嗣氏には、試験練り、試験体の作製および立会い実験時などでセグメント工場に出向く際、お忙しい中スケジュールの調整や実験の段取りなどご対応いただきました。時には懇親会にお誘いいただき、情報交流をさせていただきました。心よりお礼申し上げます。新井廣行氏、岡山奨氏、斉藤良二氏、星英徳氏、太田勝也氏、國藤崇氏、峯崎晃洋氏、清水亮一氏、荒井孝氏には、セグメント工場にて実験を行う際に、セグメント製作のノウハウをご指導いただいたり、施工性の改善策をご提案いただいたり、実験やセグメントの製造に関して非常に貴重なご指摘やご意見をいただきました。心よりお礼申し上げます。第一コンクリート株式会社 西家芳正氏には現場打ちコンクリートの研究に際し、試験練りや施工実験の計画の立案にご協力いただいたり、生コン製造のノウハウをご指導いただき大変助かりました。おかげで円滑な実験を行うことができました。心よりお礼申し上げます。また、当時在籍しておられた平田真喜雄氏、飯野雄太氏には、生コンの出荷で忙しいところ実験ヤードを貸していただいたり、試験練りや施工実験にご協力いただきました。また、現場への生コン供給の際にもご尽力いただき大変助かりました。心よりお礼申し上げます。

ダイワボウポリテック株式会社 樋口健作氏, 松田孝司氏, 原田博成氏, 高田雅之氏には, お忙しい中アスペクト比の異なるポリプロピレン短繊維を段取りしていただき, 非常に助かりました。心よりお礼申し上げます。エスメント関東株式会社 長尾之彦氏, 鈴木孝治氏には, 高炉スラグ微粉末を供給していただきました。実験用の材料として少量の材料を缶詰めしていただいたり, 急な注文にも快く対応いただき大変助かりました。心よりお礼申し上げます。株式会社デイ・シイ 大澤友宏氏には, 高炉セメントや高炉スラグ微粉末を供給していただいたり, 耐火実験用の試験体の作製や施工実験の際にご協力いただきました。冬季の養生対策として気泡緩衝材を買いに走っていただいたご恩は一生忘れません。心よりお礼申し上げます。BASF ジャパン株式会社 阿合延明氏, 山宮浩信氏ならびにポゾリスソリューションズ株式会社 小山正直氏には, 混和剤を供給していただいたり, 試験練りやセグメント製造の際にご協力いただきました。表面水率や外気温の変動に応じて, とともに混和剤の添加率の調整に苦労した経験が懐かしく思い出されます。心よりお礼申し上げます。株式会社フローリック 檜垣誠氏, 中島啓喜氏ならびに当時在籍しておられた末岡敏美氏には, 混和剤の供給, 二次製品工場での試験練りやセグメントの製造の際にお世話になりました。実験の際にはいつも駆けつけていただき, 円滑に実験を進めることができました。心よりお礼申し上げます。株式会社東京測器研究所に在籍しておられた西田恵一氏には, 1000°C以上の温度を計測できる熱電対についてご指導いただきました。高価な R 型熱電対や割れやすいセラミック管の設置とともに悩んだことが思い出されます。心よりお礼申し上げます。

株式会社太平洋コンサルタント 宮崎昇氏, 赤塚久修氏には, お忙しい中耐火実験の実施や慣れないエコーチップピッコロによる劣化深さの測定にご支援いただきました。いつも前向きな姿勢でご協力いただき, 大変助けられました。心よりお礼申し上げます。株式会社ケミカル工事 尾崎稔氏ならびに当時在籍しておられた深川克彦氏には, ウォータージェットによる研り工法の研究にあたり, 施工機械の段取りや実験の実施にご協力いただきました。今はなきコンクリート実験棟の地下ピットでの実験が懐かしいです。お世話になりました。心よりお礼申し上げます。株式会社テクノ・ブリッド 青木茂氏, 東急建設株式会社 伊藤正憲氏, 早川健司氏, 日本化成株式会社 森脇貴志氏, 紀陸和昭氏, 昭栄薬品株式会社 長野央照氏ならびに山代育民氏には, 耐火性を有する吹付け工法の研究にあたり, とともに課題の解決に向けたアイデアを出し合ったり, セメントまみれになりながら吹付け実験を行ったり, 大変ながらも良い経験をさせていただきました。心よりお礼申し上げます。株式会社トクヤマ 古城誠氏, 株式会社トクヤマエムテック 末益大祐氏には, 耐火性を有する左官工法の研究にあたり, 材料を供給していただいたり, 火災工学実験棟に来所いただき, 実験をお手伝いいただきました。心よりお礼申し上げます。

最後に, 満足に家族サービスができない中, 終始支えてくれた妻 貴子, 明るく応援してくれた長男 悠太, 次男 慶斗に心から感謝いたします。何年も帰省できない私の健康を常に気遣ってくれた父 治雄, 優しい励ましの言葉をかけてくれた妹 山下陽子に心よりお礼申し上げます。また, いつも温かく応援してくださった義父 渡邊守氏, 義母 渡邊克代氏に心よりお礼申し上げます。家族, 親族のご協力があって, 論文を完成することができました。深く感謝いたします。

本研究は, 多くの方々のご指導, ご支援のもとに達成することができました。ここに改めて皆様に謝意を表し, 謝辞と致します。

2020年3月 川西貴士

本研究に関連した論文リスト

1 査読付き論文

- 1) 川西貴士, 平田隆祥, 青木茂: ポリプロピレン短繊維を用いた耐火性吹付工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.577-582, 2007
- 2) 川西貴士, 屋代勉, 田中善広, 小林一博: ポリプロピレン短繊維による鋼繊維補強コンクリートの耐火性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.333-338, 2008
- 3) 川西貴士, 近松竜一, 屋代勉, 香川敦: 火害を受けたコンクリートの劣化範囲の推定方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1171-1176, 2013
- 4) 春日清志, 遠藤啓一郎, 藤井剛, 屋代勉, 川西貴士: シールドトンネルにおける現場打ち耐火コンクリートの適用検討, トンネル工学報告集, Vol.24, II-10, pp.1-6, 2014
- 5) 川西貴士, 平田隆祥, 河合研至: 短繊維を混入したコンクリートの配合設計方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.265-270, 2017
- 6) 川西貴士, 平田隆祥, 河合研至: ポリプロピレン短繊維を混入したコンクリートの流動性および材料分離抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.999-1004, 2018
- 7) Kawanishi, T., Hirata, T., Yashiro, T., Kawai, K: A Simple Method to Evaluate the Depth of Concrete Degradation by Fire, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.17, pp.639-647, 2019

2 参考論文

- 8) Yashiro, T., Kawanishi, T., Kobayashi, K: Fire-proofing Performance of SFRC Segment with Polypropylene fiber against Explosive Spalling of Lining Concrete of Shield Tunnels, World Tunnel Congress and 36TH General Assembly, ITA-AITES, Vancouver, Canada, pp.1-8, 2010
- 9) 川西貴士, 近松竜一, 吉田公宏, 屋代勉: 耐火型高機能 SFRC セグメントの開発, 大林組技術研究所報, No.74, pp.1-6, 2010
- 10) 川西貴士, 近松竜一, 屋代勉, 富井孝喜: トンネル覆工用コンクリートの爆裂およびはく落抵抗性に関する研究, 大林組技術研究所報, No.75, pp.1-6, 2011
- 11) 川西貴士, 平田隆祥, 屋代勉: 都市部に構築される道路トンネルの総合的な耐火工構築技術, 大林組技術研究所報, No.79, pp.1-10, 2015