

報告 ポリプロピレン短繊維を用いた耐火性吹付け工法の開発

川西 貴士^{*1}・平田 隆祥^{*2}・青木 茂^{*3}

要旨：構造体コンクリートの断面修復や増厚に、耐久性や一体性を確保する目的で、ポリマーセメントモルタルが用いられている。ポリマーセメントモルタルは、合成樹脂が添加されているため、高温履歴を受けた場合に、爆裂に対する抵抗性が低下することが問題視されている。そこで、ポリプロピレン短繊維を急結型ポリマーセメントモルタルに混入して吹き付けた試験体を作製し、RABT 曲線による耐火試験を行った。その結果、爆裂を抑制できるとともに、構造体コンクリートの強度が確保できる耐火性吹付け工法が可能であることを確認した。

キーワード：ポリプロピレン短繊維，ポリマーセメントモルタル，耐火，吹付け，爆裂

1. はじめに

トンネル内で大規模火災が発生した場合、ガソリン、油や木材など可燃性の物質が閉鎖された空間で燃焼する可能性があり、トンネル内は急速に 1000℃を超える高温に晒される。このような高温履歴を受けた場合、覆工コンクリートが爆裂したり、強度低下を引き起こすことにより、大きな損傷を受けること¹⁾が問題となっている。

一方、塩害や中性化などによって劣化したコンクリート構造物の断面修復や増厚には、耐久性と、構造体コンクリートとの一体性を確保するために、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM と呼称）が用いられる場合が多い。PCM は、合成樹脂の添加によって爆裂に対する抵抗性が低下すること²⁾が問題とされている。

そこで、耐火性を付与した吹付け工法の開発を目的として、爆裂に対して効果的であると思われるポリプロピレン短繊維（以下、PP 繊維と呼称）を混入した急結型 PCM を用いて試験体を作製した。次に、RABT 曲線による耐火試験を行い、爆裂に対する抵抗性と構造体コンクリートの強度低下を抑制できる吹付け厚さを確認した。

2. 火害劣化に関する既往の研究

高温履歴を受けたコンクリートの火害は、主として、1)爆裂による断面欠損、2)火災後の強度低下の2つが挙げられる。

前者の爆裂の原因は、コンクリート内の水分が気化する際に発生する水蒸気圧によって、表層のコンクリートが剥離する水蒸気圧説が挙げられる。この爆裂現象の対策として、PP 繊維をあらかじめコンクリート内に混入しておき、高温履歴を受けた場合、この PP 繊維が熔融・気化して水蒸気圧を逃がす空隙を形成させる方法³⁾がとられている。

また、後者の強度低下の原因としては、コンクリート中の水酸化カルシウムの脱水に伴う化学変化により、水和組織の強度が低下することが挙げられる。この強度低下の対策として、耐火パネルや耐火吹付けなどの耐火層を設けることで、急激な強度低下を起こすと言われていた 300℃以下⁴⁾に抑制し、構造体コンクリートを保護する方法がとられている。

そこで、PP 繊維を混入した PCM を耐火層として用いることで、火災時の爆裂を抑制し、かつ、構造体コンクリートの健全性を確保することを考えた。

*1 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 リニューアルグループ 主任 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 リニューアルグループ 副主査 工博 (正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 土木材料研究室 専任役 工博 (正会員)

表-1 実験ケース

試験体記号	試験体寸法 (mm)	吹付け厚さ (mm)	PP繊維添加量 (vol%)	耐火試験	曲げ載荷試験
P-00F	L1200×B1200×H300	100	0.0	○	-
P-05F	L4700×B800×H500	50	0.5		
P-10F			1.0		
P-NF	L4700×B800×H450	-	-	-	○

表-2 配合および品質

試験体記号	PCM					構造体コンクリート		
	水結合材比 W/B (%)	砂結合材比 S/B (%)	ポリマー結合材比 P/B (%)	PP繊維添加量 (vol%)	材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)	水結合材比 W/B (%)	材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ載荷試験時圧縮強度 (N/mm ²)
P-00F	-	-	-	0.0	62.7	59.5	36.5	-
P-05F	38.0	1.9	5	0.5	51.0	42.7	56.5	59.6
P-10F	-	-	-	1.0	59.0		54.7	
P-NF	-	-	-	-	-	-	48.8	52.8

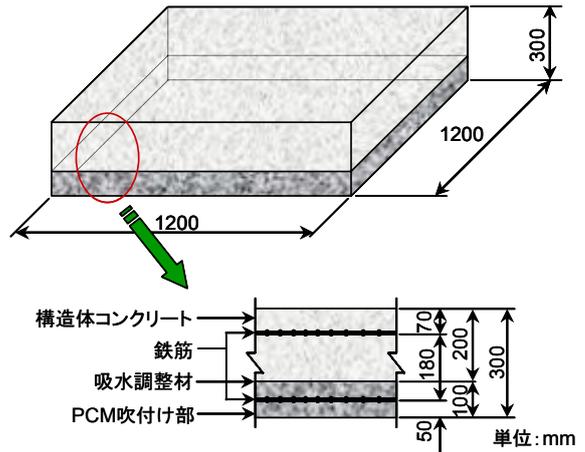


図-1 試験体概略図 (P-00F)

3. 実験概要

3.1 試験体の作製

(1) 実験ケース

実験ケースを表-1 に示す。P-00F, P-05F および P-10F は、構造体コンクリートに PCM を吹付け、耐火試験を実施した。PP 繊維の添加量は 3 水準とした。P-00F は、予備的に試験を行い、次に、P-05F および P-10F を作製し、試験を行った。P-10F については、耐火試験後曲げ載荷試験を行い、火災後の耐力および変形性能を確認した。また、構造体コンクリートの健全性を比較するために、試験体高さを、吹付けを行う前の 450mm とした P-NF も用意した。P-NF は加熱を行わず、曲げ載荷試験のみを行った。

(2) 使用材料

PCM および構造体コンクリートの配合および品質を表-2 に示す。PCM はプレミックス材料を使用し、ポリマーは酢酸ビニル・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。PP 繊維は、繊度 13dtex (換算径 43 μm 程度) のものを使用した。

(3) 試験体の形状

試験体の概略図を図-1 および図-2 に示す。P-00F は、スラブ状試験体とし、吹付け厚さは 100mm とした。主鉄筋として上段に D10 を水平間隔 100mm, 下段に D19 を水平間隔 200mm で配置した。P-05F および P-10F は、梁状試験体と

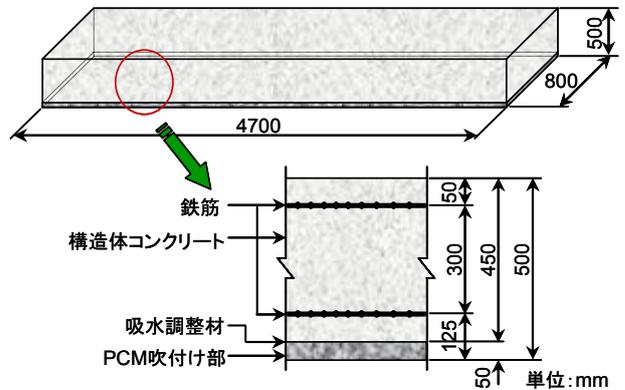


図-2 試験体概略図 (P-05F および P-10F)

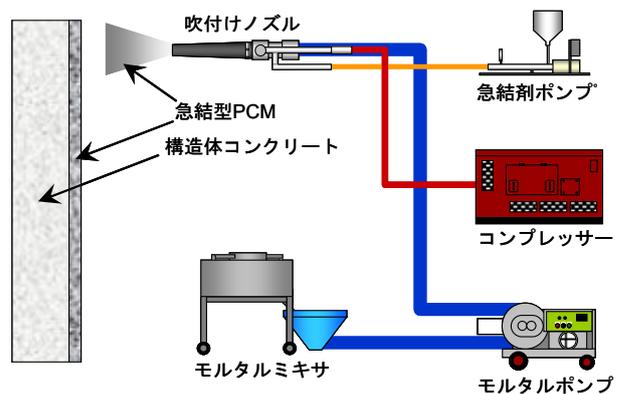


図-3 吹付けシステムの概要

し、吹付け厚さは 50mm とした。主鉄筋として上下段とも D22 を水平間隔 125mm で配置した。P-NF は、図-2 の PCM による吹付け部がない試験体とした。P-05F, P-10F および P-NF は、コストダウンの観点から、構造体コンクリートに鋼繊維補強コンクリートを使用した。鋼繊維の添加量は、0.8vol% とした。

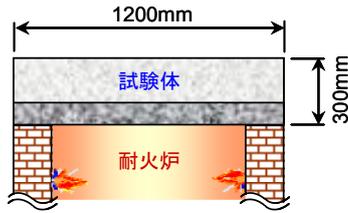


図-4 耐火試験概略図 (P-00F)

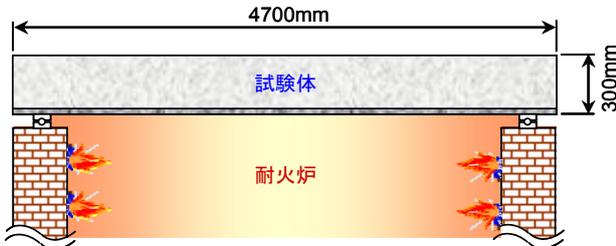


図-5 耐火試験概略図 (P-05F および P-10F)

(4) 試験体の作製方法

あらかじめ作製した構造体コンクリートに、PP 繊維を混入した PCM を吹き付けて試験体を作製した。図-1 および図-2 に示すように、吹き付ける構造体コンクリートの表面は、吸水調整材により処理を行った。P-00F については、断面増厚し、P-05F および P-10F については、構造体コンクリートを 50mm 研りとり、その後吹付けて修復を行うことで、試験体を作製した。

PCM は、プレミックス材料に加水した後 3 分間練り混ぜ、その後 PP 繊維を投入し、さらに 1 分間練り混ぜて製造した。練り混ぜた PCM 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。コンプレッサーで空気を送り、モルタルを噴出させることにより、吹き付けた。図-3 に吹付けシステムの概要を示す。

また試験体完成後、P-05F および P-10F は、実構造物に発生する圧縮応力を考慮し、PC 鋼棒を用いて、ポストテンションにより 13N/mm^2 の軸力を導入して、耐火試験を行った。

3.2 耐火試験

耐火試験は一面加熱とし、試験体を耐火炉の上部に設置し、試験体の下面を加熱した。耐火試験の概略図を図-4 および図-5 に示す。

加熱条件は、トンネル火災を想定した図-6 に示す加熱開始後 5 分間で 1200°C まで昇温するド

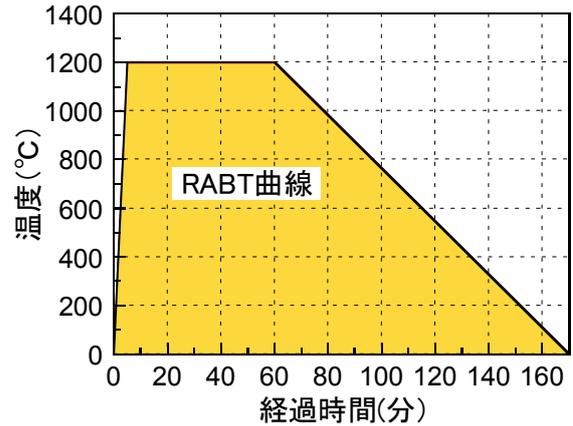


図-6 RABT 曲線⁵⁾

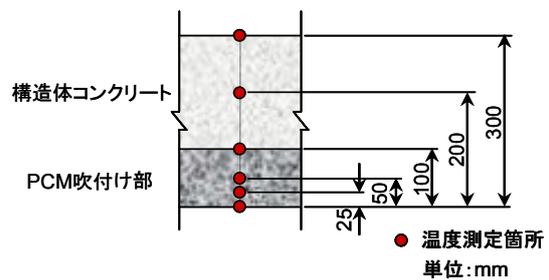


図-7 コンクリート温度測定箇所 (P-00F)

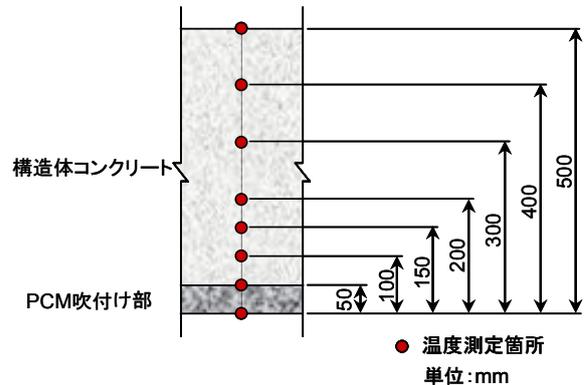


図-8 コンクリート温度測定箇所 (P-05F および P-10F)

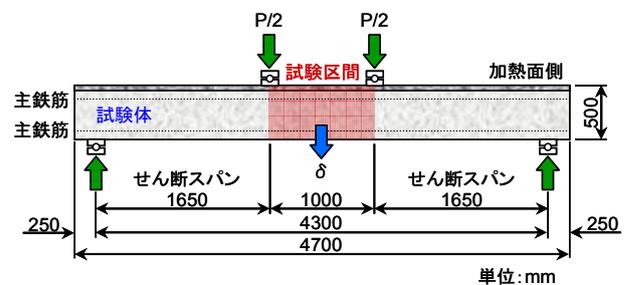


図-9 曲げ載荷試験概略図

イツ規格の RABT 曲線⁵⁾を採用した。

測定項目は、試験体の断面内温度分布、耐火試験後の外観調査および爆裂深さとし、温度分

布については、あらかじめ埋設した熱電対で測定した。温度分布の測定箇所を図-7 および図-8 に示す。測点数は、P-00F は 6 点、P05F および P-10F は 8 点とした。また耐火炉内に熱電対を配置し、炉内温度も併せて測定した。

3.3 曲げ载荷試験

P-10F および P-NF については、静的 2 点曲げ载荷試験を行った。図-9 に曲げ载荷試験の概略図を示す。PCM 吹付け部は、圧縮部材として機能することを想定しており、加熱による強度劣化の影響を確認するため、加熱面を圧縮側として载荷を行った。測定項目は、ロードセルにより载荷荷重を、電気変換式変位計により中央部の変位を測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 耐火試験結果

(1) 爆裂性状

耐火試験後の状況を写真-1～3 に示す。また、爆裂深さの分布図を図-10～12 に示す。P-00F は、加熱面全体に激しい爆裂が生じ、爆裂により、吹付け修復部の中央に設置した鉄筋の付近まで損傷を受けた。爆裂深さは、図-10 に示すとおり、最大で 59mm、平均で 32mm に達した。加熱開始後数分で爆裂が発生し、15 分が経過した段階で、安全上の観点から加熱を中止した。なお、加熱をさらに継続した場合には、爆裂深さは増大したと思われる。

P-05F についても、全面に爆裂が生じたが、RABT 加熱終了後に測定した爆裂深さは、最大で 57mm、平均で 26mm であり、P-00F に比べて損傷の程度が軽減された。

P-10F は、PP 繊維の添加量を 1.0vol% 混入することで、爆裂を抑制できた。PCM に PP 繊維の混入量を増加することで、爆裂に対する抵抗性を向上できることが確認された。

(2) 断面内温度分布

断面内の温度分布を図-13～15 に示す。P-00F は、図-13 に示すように深さ 0mm および 25mm の位置の温度が急激に上昇しており、加熱開始



写真-1 耐火試験後状況 (P-00F)



写真-2 耐火試験後状況 (P-05F)



写真-3 耐火試験後状況 (P-10F)

後数分の段階で爆裂が生じた影響と思われる。また、深さ 50mm の位置の温度は、10 数分後から急上昇しており、爆裂が、継続的に進行したことが裏付けられる。

P-05F は、加熱開始後 3 分程度で爆裂が発生し、12 分程度まで継続したが、その後、爆裂は進行しなかった。図-14 に示すように、加熱開始後 10 分程度で、深さ 50～100mm の位置の温度が上昇しているが、これは爆裂の影響が大きいもの

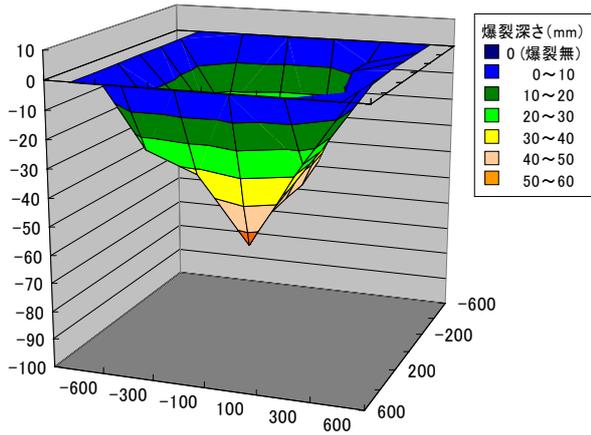


図-10 爆裂深さ分布図 (P-00F)

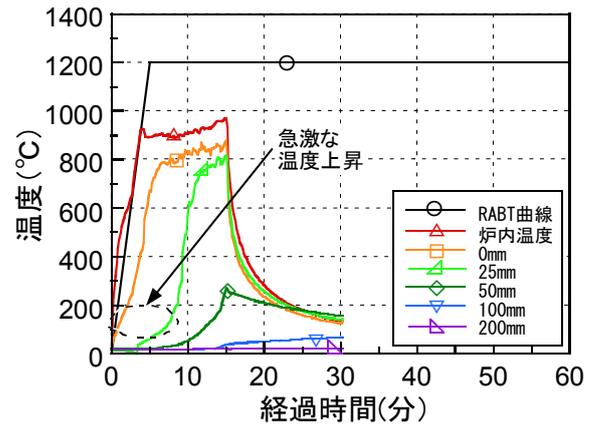


図-13 温度履歴図 (P-00F)

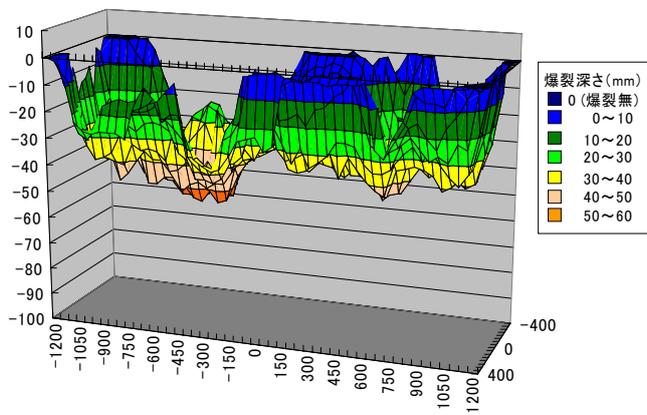


図-11 爆裂深さ分布図 (P-05F)

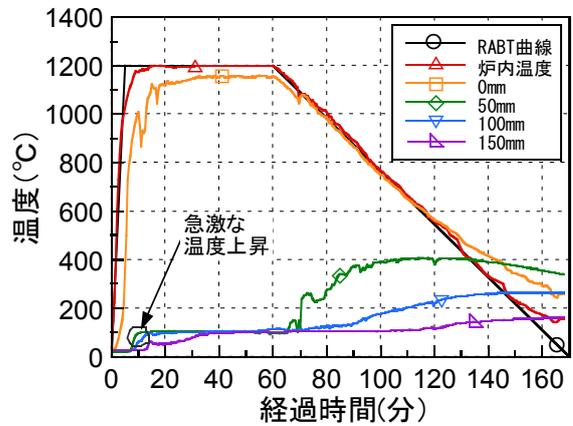


図-14 温度履歴図 (P-05F)

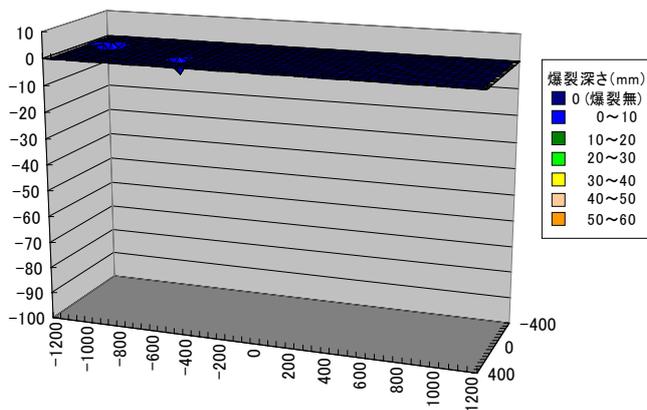


図-12 爆裂深さ分布図 (P-10F)

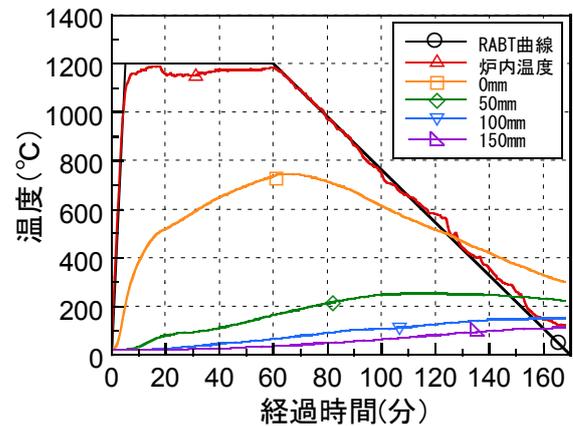


図-15 温度履歴図 (P-10F)

と思われる。その後、70 分付近まで 100°C の状態が続いている。これは、コンクリート内の水分が気化しているためと思われる。PCM 吹付け部の裏面となる、深さ 50mm の最高温度は、400°C 程度まで達しており、その位置の構造体コンクリートの強度は低下したと思われる。

一方、P-10F は、図-15 に示すように、いずれの位置の温度履歴も緩やかな曲線を示している。急激な温度変化や特異点が認められないことから、爆裂の抑制が裏付けられた。

深さ方向のコンクリートの最高温度分布を図-16 に示す。300°C に達する深さは、45.4mm と

なった。安全性を考慮すると、PCMの必要吹付け厚さは50mm程度となり、その深さにおける最高温度は、262℃に抑えられる。

4.2 曲げ載荷試験結果

P-10FおよびP-NFにおける荷重と変位の関係を図-17に示す。両者を比較すると、最大耐力については、ほぼ同程度の値を示した。変位については、P-NFは95mm付近で荷重が低下しているが、P-10Fは125mm付近まで耐力を維持しており、十分な変形性能が得られた。このように、荷重および変位とも、顕著な差異が認められないことから、PCMを耐火被覆層として、構造体コンクリートに50mm吹き付けることにより、RABT曲線による加熱履歴を受けても、構造体コンクリートの強度は保たれることが確認できた。したがって、このPCM耐火層は、構造体コンクリートを火災から保護する機能があることが証明された。

5. まとめ

PP繊維を混入した急結型PCMを吹き付けた試験体を作製し、RABT曲線による耐火試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) PCMにPP繊維を1.0vol%混入することで、RABT曲線による高温履歴を受けても、爆裂を抑制できる。
- (2) 耐火被覆層としてPCMを50mm吹き付けることで、構造体コンクリートの温度を300℃以下に保つことができる。

したがって、この吹付け工法を用いることで、構造体コンクリートの強度を確保し、かつ、補強効果のある耐火被覆層を形成する耐火性吹付け工法が可能となる。今後、劣化したコンクリートの断面修復や、耐火性を兼ね備えた断面増厚補強などに適用できるものと思われる。

謝辞

本開発にご協力いただきました日本化成(株)、昭栄薬品(株)、(株)ジェーフェックおよび萩原工業(株)の方々に深く感謝いたします。

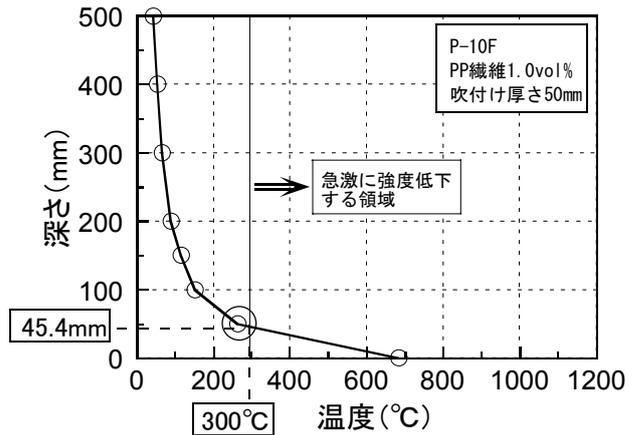


図-16 深さ方向の最高温度分布

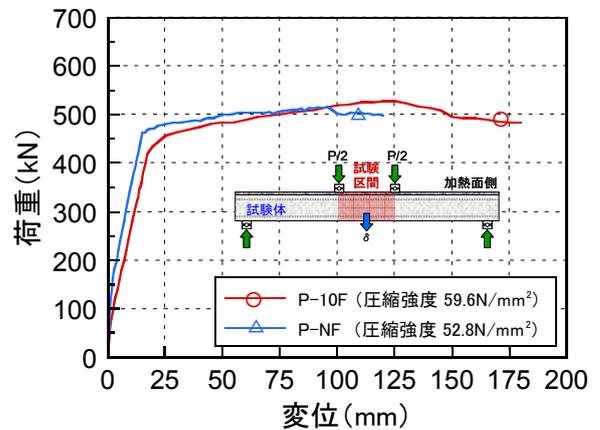


図-17 荷重と変位の関係

参考文献

- 1) 森田武：トンネル火災におけるコンクリートの耐火性について、コンクリート工学, vol.38, No.11, pp61-65, 2000.11
- 2) 岡村一臣ほか：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, 1984.6
- 3) 高野智宏ほか：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, 2005.6
- 4) 古村福次郎：コンクリートと熱 (2), コンクリート工学, vol.17, No.9, pp53-61, 1979.9
- 5) コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp185, 2002.6