

特集 「火災に強い都市をめざして」

トンネル覆工用耐火コンクリートの開発

—セメント材料の検討と実物大規模の耐火試験による検証—

石 田 知 子 川 西 貴 士
嶋 英 信 田 中 善 広
(本社土木技術本部)

A Development of Fireproof Concrete Lining

— Examination of Cement Material and Verification by Fire Test on Full-scale —

Tomoko Ishida Takashi Kawanishi
Shima Hidenobu Yoshihiro Tanaka

Abstract

High strength concrete is applied for concrete lining in urban tunnels, since the construction depth and demands of cost reduction increases. Although the insulation layer has been attached at the surface of concrete lining, problem exists in its high cost. Fire resistance capacity should be improved in high strength concrete without rising cost, since risk of explosion of the concrete is high. Polypropylene fiber contained concrete is effective to prevent explosion due to vapor pressure at the fire history. And unique cement without portlandite generation is also effective to prevent strength reduction at high temperature more than 350 C degree. The study demonstrated that above concept is applicable and effective in tunnel lining by actual sized fire test.

概 要

大断面化や大深度化に伴い、都市トンネルの覆工コンクリートに高強度コンクリートを使用する施工事例が増加している。一般の都市トンネルでは、トンネル内の火災を想定して耐火被覆材が使用されている。しかし、建設コスト削減の観点から、高価な耐火被覆材の代替としてコンクリートに耐火性を付与することが効果的である。建築分野では、コンクリートの爆裂防止対策として有機繊維の混入が有効であることが示されている。ここでは、この爆裂防止対策が土木分野にも適用できること、また、水酸化カルシウムの生成量を抑制することで火災後の強度低下を抑制できる可能性があることを確認した。さらに、実物大規模の耐火試験の結果、有機繊維を混入したコンクリートとすることで爆裂を防止し耐火性を確保できることが実証された。

1. はじめに

1989年に東名高速道路の日本坂トンネルで発生した大規模トンネル火災は、大型トラック4台と乗用車2台の追突事故が原因で、大型トラック2台に合成樹脂の原料と松根油の可燃性物質が搭載されていたことで火災の規模が拡大した。火災後の調査結果によると、コンクリートの表面温度は600～1000℃程度まで上昇したものと推定されている。

トンネル火災の場合は、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。近年の研究から、このような高温履歴を受ける条件下では、高強度コンクリートになるほど爆裂が生じやすいことが明らかになってきた¹⁾。

断面の大型化や大深度化が進む都市型トンネルの覆工コンクリートにおいては、圧縮強度が50～70N/mm²の高強度コンクリートを使用することが一般的である。火災時に爆裂によって大規模な断面欠損が生じた場合、

トンネルの崩壊に繋がりがねないため、従来は耐火被覆材を設置し、コンクリートの表面が高温に曝されないよう対策が講じられている。しかし、この耐火被覆材は高価であること、その設置作業に伴い工期が長くなること、さらに内空間を確保するためにトンネル掘削断面が大きくなることなど、コストアップにつながる諸問題があり、耐火対策の合理化が求められている。

そこで、覆工コンクリートの機能性として、新たに耐火性を付与することを目的としてトンネル覆工用耐火コンクリートの開発に向け検討を行った。

本報では、Part1：耐火性を確保するための材料に関する基礎試験、およびPart2：耐火層を含むトンネル覆工コンクリートを模擬した実規模の大型試験体による耐火試験による耐火コンクリートの検討結果についてまとめる。

2. Part1 耐火性を付与するための材料試験

2.1 高温履歴を受けたコンクリートの劣化低減対策

高温履歴を受けたコンクリートの火害としては、1)表

層部爆裂に伴う断面欠損、2)火災後の強度低下、の2つが挙げられる、

1)のコンクリート表層部の爆裂の原因としては、高温下でコンクリート中の水分が気化する際に発生する水蒸気圧が、内圧として作用し表層のコンクリートをはく離させる水蒸気圧説が挙げられる。この爆裂現象の対策としては、有機繊維（例えば、ポリプロピレン繊維）をあらかじめ混入しておき、高温に晒された際にこの有機繊維が熔融・気化して水蒸気圧を逃がす空隙を形成することで爆裂を防止する方法がある。高強度コンクリートを使用する高層ビル等の建築構造物で多く適用されている。また、鋼繊維を混入することで、その架橋効果により爆裂深さを低減できるという結果²⁾も報告されている。

一方、2)の強度低下の一因として、450℃以上の範囲でセメント水和物のうち、水酸化カルシウム（以下、CHと記す）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指摘されている³⁾。この強度低下の抑制対策としては、硬化コンクリート中の水酸化カルシウムの生成量を減らすことや鋼繊維の混入による補強などが考えられる。

以上の知見をもとに、爆裂防止対策として有機繊維（ポリプロピレン繊維）を使用することを前提条件とし、さらに爆裂防止と強度低下の低減対策として、鋼繊維（スチールファイバー）を混入したコンクリート、また、強度低下の抑制対策としてCHの生成量を抑制したセメント（以下、CHフリーセメントと呼称する）を用いたコンクリート（以下CHフリーコンクリートと呼称する）について耐火試験を実施し、コンクリートの耐火性能について検証した。

2.2 試験概要

試験ケースをTable 1に示す。各供試体に使用したコンクリートの配合をTable 2に示す。

有機繊維と鋼繊維を混入した試験体については、トータルの繊維量を1.0vol%となるよう設定した。

CHフリーセメントとは、高炉スラグ微粉末やシリカフュームを混和材として用い、ポゾラン反応を応用して

CHの生成量を抑制したセメントである。試験体CH1+PPは普通ポルトランドセメントにシリカフュームと高炉スラグ微粉末を混和したセメントを使用した場合で、試験体CH2+PPは混和材としてシリカフュームと石灰石微粉末を混和したセメントを使用した場合である。これらの試験体では繊維混入量を変化させ、ポリプロピレン繊維の熔融により形成される空隙量が圧縮強度に及ぼす影響についても検討した。なお、普通ポルトランドセメントを用い、有機繊維のみを混入したケースについても検討を行った。

試験体はφ100×200mmの円柱供試体で、材齢24時間で脱型後、材齢28日まで20℃水中養生した。

試験体の加熱はプログラム調節器付き電気炉を使用した。試験体に与えた加熱履歴をFig. 1に示す。加熱速度は200℃/hとし、600℃で120分間保持した後、徐々に温度を降下させ、常温になった時点で圧縮強度試験を実施した。

CHフリーコンクリート試験体は、CHの生成の有無を確認するため、加熱前後の試料についてX線回折の測定も実施した。

2.3 試験結果および考察

Table 1 試験ケース
Examination case

試験ケース No.	セメント 種類	有機繊維	鋼繊維
3	OPC	○	—
1・2	OPC	○	○
4・5	CH1	○	—
6・7	CH2	○	—

OPC：普通ポルトランドセメント

CH1：CHフリーコンクリート

(OPC：SF：BFS：LSP=4：2：4：0)

CH2：CHフリーコンクリート

(OPC：SF：BFS：LSP=4：2：0：4)

SF：シリカフューム

BFS：高炉スラグ微粉末

LSP：石灰石微粉末

Table 2 コンクリートの配合
Mix design conditions

試験体 No.	試験体 記号	混合比率（重量％）				PP (vol%)	SF (vol%)	空気量 (%)	水粉体 比 (%)	水結合 材比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量(kg/m ³)				
		OPC	SF	BFS	LSP							W	P	S	G1	
1	N+ PP+SF	100	0	0	0	0.25	0.75	6.0	35.0	35.0	65.0	170	486	925	609	
2						0.35	0.65									
3	N+PP	100	0	0	0	0.3	0	4.5	30.0	30.0	54.7	150	500	930	776	
4	CH1+PP	40	20	40	0	0.3	0					150	500	903	753	
5						0.6	0									
6	CH2+PP	40	20	0	40	0.3	0			50.0		150	500	896	747	
7						0.6	0									

OPC：普通ポルトランドセメント SF：シリカフューム BFS：高炉スラグ微粉末 LSP：石灰石微粉末

W：水 P：粉体（OPC+SF+BFS+LSP） S：細骨材（陸砂） G：粗骨材（碎石）

PP：ポリプロピレン繊維（φ=2.2tex，L=10mm） SF：鋼繊維（φ0.6mm，L=30mm）

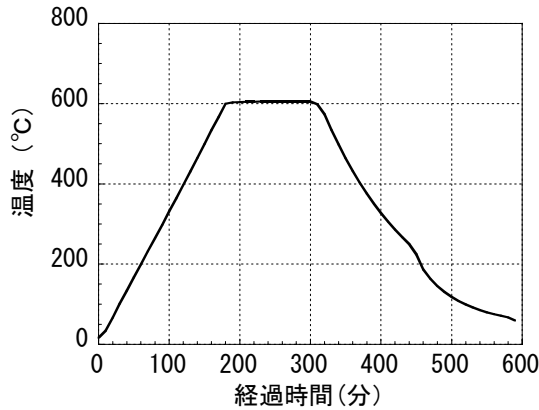


Fig. 1 加熱履歴
Heating curve

Table 3 圧縮強度試験結果
Compression strength test result

試験体 No.	試験体 記号	圧縮強度 (N/mm ²)		
		加熱前	加熱後	圧縮強度 残存比
1	N+ PP+SF	72.5	36.9	0.51
2		75.5	33.9	0.45
3	N+PP	75.3	31.2	0.41
4	CH1+PP	64.1	41.1	0.64
5		67.4	43.6	0.65
6	CH2+PP	57.8	40.8	0.71
7		58.1	41.7	0.72

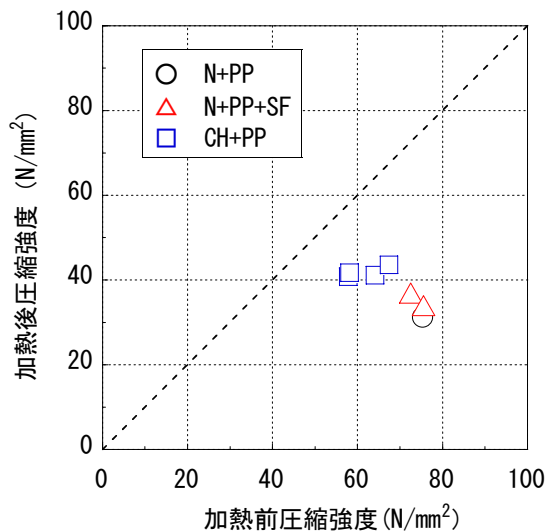


Fig. 2 圧縮強度試験結果
Compression strength test result

いずれの試験体も加熱試験において爆裂を生じておらず、有機繊維および鋼繊維により 600°C の範囲での爆裂抑制効果が確認できた。

各種試験体の加熱前後の圧縮強度試験結果を Table 3 および Fig. 2 に示す。

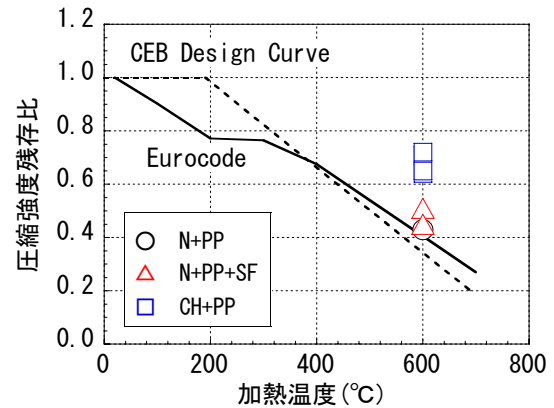


Fig. 3 圧縮強度残存比比較結果
Compression strength remaining ratio
comparison result

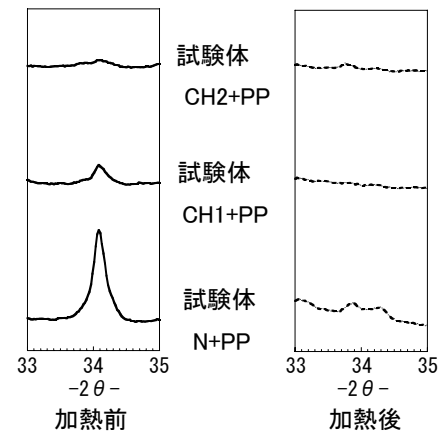


Fig. 4 X線回折試験結果
X-ray diffraction test result

いずれの試験体も加熱後の圧縮強度は加熱前に比べて低下する結果となった。また、圧縮強度残存比（加熱後の圧縮強度／加熱前の圧縮強度）は、有機繊維のみの場合は 0.41、鋼繊維を混入した場合においても 0.45、0.51 とほぼ同程度となった。したがって、鋼繊維は火災後の強度低下の抑制には寄与しないと考えられる。一方、CHフリーコンクリート試験体に着目すると、0.64～0.72 と残存比が大きくなった。

600°C 加熱後の圧縮強度残存比と Eurocode および CEB に規定されている値との比較を Fig. 3 に示す。

普通ポルトランドセメントを用いた場合は各コードとほぼ同様の結果であるが、CHフリーコンクリートを使用した場合には、いずれも各コードより残存比が大きく、高温履歴を受けた場合の強度低下の抑制に効果的であると考えられる。有機繊維の混入量の影響については加熱後の圧縮強度には大きな差異は認められない。高温履歴を与えた場合に圧縮強度が低下する影響は、加熱時に有機繊維の溶融・気化により形成される空隙だけでなく、セメント水和物の熱変質が大きく影響しているものと推測される。

X線回折試験結果のうち CH の回折ピーク ($2\theta = 34.1^\circ$) 近傍の測定チャートを図 4 に示す。

普通ポルトランドセメントを使用した試験体は、加熱前に CH の高い回折ピーク強度を示すが、加熱後には明確なピークが認められない。また、試験体 (CH1+PP) の場合、加熱前は CH の回折ピーク位置でわずかなピーク強度が認められるが、加熱後には明確なピークが認められない。したがって、CH が加熱により消失していると考えられる。一方、試験体 (CH2+PP) は、加熱前後とも明確なピークが認められず、加熱前においても CH が生成されていないものと推定される。これらの結果は、加熱後の強度低下に対して、硬化コンクリート中の CH の生成量が影響を及ぼしていることを裏付けるものと考えられる。

Table 4 試験ケース
Examination case

試験ケース No.	セメント種類	有機繊維	耐火層厚さ (mm)
N+PP	OPC	○	100
CH+PP	CH フリー セメント	○	100

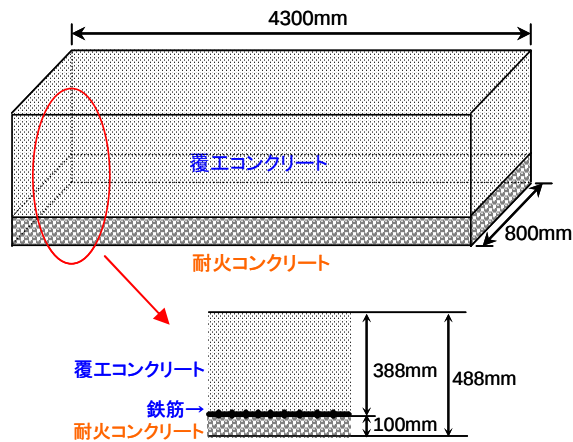


Fig. 6 試験体イメージ図
Image of specimen

3. Part2 実大規模モデル試験体による耐火試験

3.1 覆工コンクリートに要求される耐火性能

トンネルの覆工コンクリートに要求される耐火性能としては、火災時および火災後においてトンネルが崩壊しないよう、構造上必要な耐力を確保することである。一般には、使用材料の受熱温度と強度劣化の関係から、強度低下を防止するための温度の目標値として、以下のような値が設定されている。

- a) 覆工コンクリートの温度：350℃以下
- b) 覆工コンクリート中の鉄筋の温度：250℃以下

そこで、覆工コンクリートの表層部分に耐火コンクリートを設置した実物大規模の供試体による耐火試験により、爆裂の有無および上記の目標値を確保できるか否かについて検証した。

3.2 試験ケース

実規模モデル試験体は、覆工コンクリートの表層の一部を耐火コンクリートとした2層構造とした。

試験ケースを図 4 に示す。耐火コンクリートは、材料実験により火災後の強度低下の抑制効果が確認された CH フリーコンクリートを用い有機繊維を混入した場合、普通ポルトランドセメントを用い有機繊維を混入した場合の2ケースとした。

火災による強度劣化が小さい CH フリーコンクリートは、耐火コンクリートと構造部材の一部として考慮で

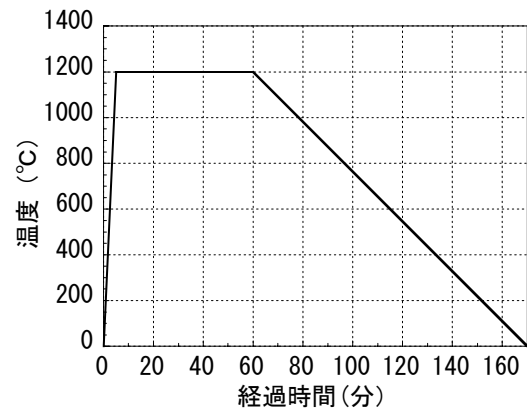


Fig. 7 加熱条件 (RABT 曲線)
Heating curve (RABT curve)

Table 5 耐火コンクリートの配合
Mix design conditions of fireproof concrete

試験体 No.	試験体 記号	混合比率 (重量%)				PP (vol%)	空気量 (%)	水粉体 比 (%)	水結合 材比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量(kg/m ³)			
		OPC	SF	BFS	LSP						W	B	S	G1
1	PP	100	0	0	0	0.3	4.5	30.0	30.0	54.7	160	533	908	751
2	CH+PP	30	20	30	20	0.3			30.0		150	500	892	738

OPC：普通ポルトランドセメント SF：シリカフェーム BFS：高炉スラグ微粉末 LSP：石灰石微粉末
W：水 P：粉体 (OPC+SF+BFS+LSP) S：細骨材 (陸砂) G：粗骨材 (碎石)
PP：ポリプロピレン繊維 ($\phi=2.2\text{d tex}$, $L=10\text{mm}$)

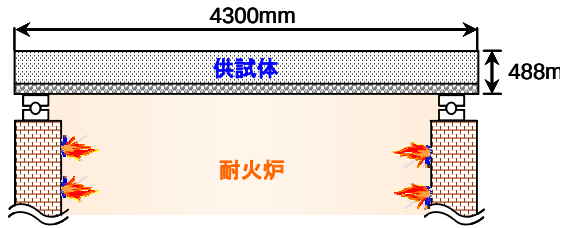


Fig. 8 耐火試験概略図
Fire test outline



Photo 1 耐火試験状況
Fire test

きる可能性が考えられる。そこで、前述の目標値のうち a) の覆工コンクリートの温度については、強度劣化が少ないことから考慮しなくても良いと判断し、鉄筋の温度を目標値以下とするのに必要なかぶり厚さを 100mm 以上と推定し、そのかぶり部分に CH フリーコンクリートを耐火コンクリートとして適用した。また、普通ポルトランドセメントを使用した試験ケースについても同様に 100mm の部分を耐火コンクリートとした。

試験体のイメージ図を Fig. 6 に示す。

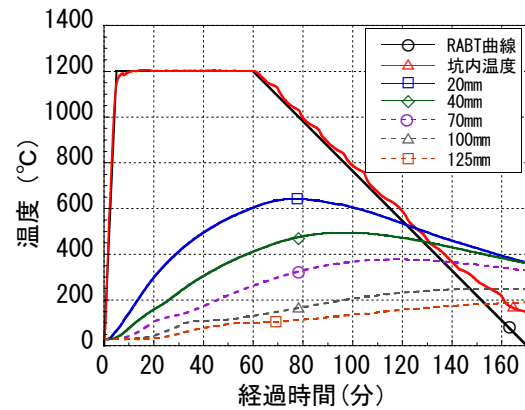
3.3 耐火試験の概要

耐火コンクリートの配合を Table 5 に示す。

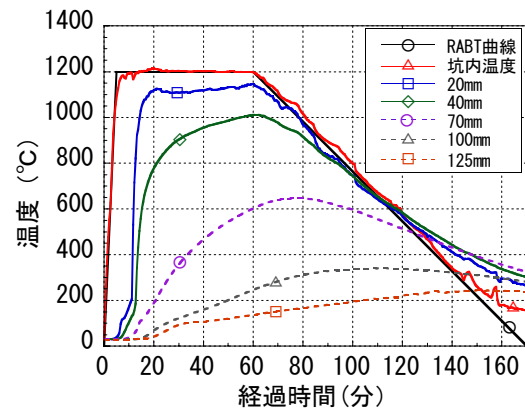
CH フリーセメントの各混和材の混合比率については、Part1 の材料試験時に使用した CH フリーセメントに比べ、より CH の生成量を抑制できると考えられる混合比率とした。

加熱は、Fig. 7 に示すように加熱開始後 5 分で 1200℃ までに上昇するトンネル火災を想定した RABT 曲線を採用した。耐火実験は、技術研究所火災工学実験棟内の汎用耐火炉を使用し、試験体の一面を加熱した。加熱時の試験概略図を Fig. 8 に示す。また、試験状況を Photo 1 に示す。

加熱中は、熱電対により、鉄筋上下面の温度、および試験体中央部の加熱面から 0, 20, 40, 70, 100, 125, 165, 225, 325, 425mm の位置でコンクリート温度を測定した。



試験体 No. 1 (N+PP)



試験体 No. 2 (CH+PP)

Fig. 9 温度履歴図

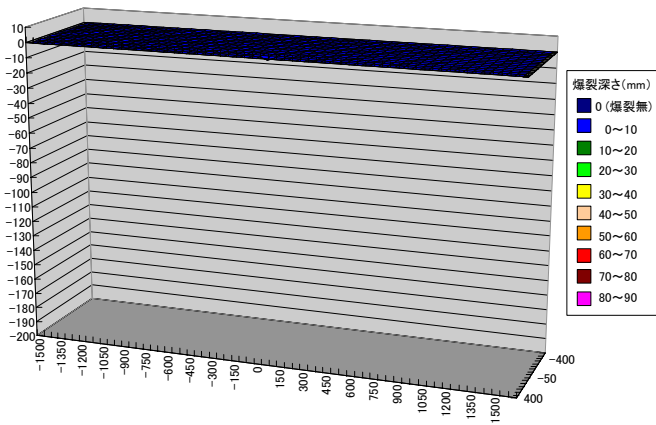
Temperature history

3.4 試験結果および考察

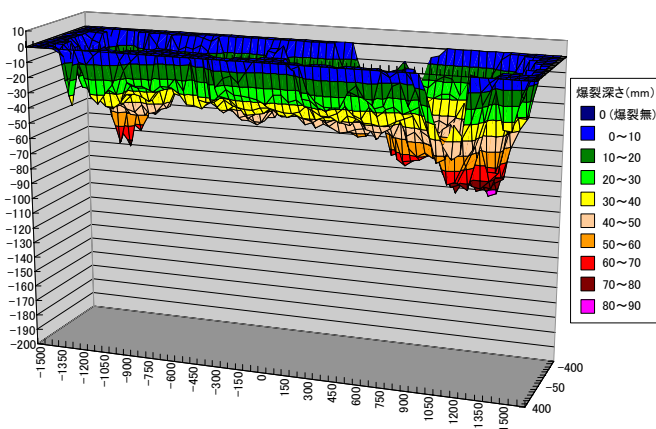
各試験ケースにおける加熱時の試験体の温度履歴図を Fig. 9 に示す。また、加熱後の試験体加熱面の爆裂深さ測定結果を Fig. 10 に示す。

(N+PP) 試験体は、爆裂は全く生じなかった。一方、(CH+PP) 試験体は、普通ポルトランドセメントを使用した (N+PP) 試験体と同量の有機繊維を混入したが激しい爆裂現象が認められ、爆裂深さは最大で 85mm となった。温度履歴図を見ると、加熱面表面からの爆裂の影響により、計測位置 20mm および 40mm での温度が急激に上昇しているのが認められる。プログラム調節器付き電気炉を使用した材料試験では爆裂現象は認められなかったが、加熱開始直後から急激に温度上昇する RABT 曲線では、有機繊維の熔融温度より低い温度で爆裂している可能性が考えられる。そのため、今後は低融点の有機繊維を使用した場合について検討を行う予定である。

普通ポルトランドセメントを使用した試験体の各計測位置と最高温度の関係を Table 6 および Fig. 11 に示す。普通ポルトランドセメントを使用した場合、全く爆裂を生じなかったことから、耐火コンクリートと成り得ると考えられる。しかし、前述の材料試験結果に見られるように、火災後の強度劣化が懸念される。そのため、強度



試験体 No. 1 (N+PP)



試験体 No. 1 (CH+PP)

Fig. 10 爆裂深さ測定結果

Explosion depth measurement result

劣化を防止するための覆工コンクリート温度の目標値 (350℃) を上回った部位については、構造部材として考慮しないか、あるいは火災後の補修が必要となる。本試験結果より、その範囲を推定すると表面からおよそ 80mm 程度の範囲となる。また、鉄筋の温度は最高で 251℃となり、極めてわずかではあるが、目標値の 250℃を上回る測定結果となった。したがって、鉄筋までのかぶりは、110mm 程度は確保しておく必要があると考えられる。

4. まとめ

トンネルの覆工コンクリートを対象として、耐火コンクリートの実用化試験を実施した結果、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 有機繊維 (ポリプロピレン繊維) を混入することにより PABT 曲線下で爆裂を防止することができ、耐火コンクリートとして成立する。
- 2) 普通ポルトランドセメントを使用した場合、600℃の高温履歴を受けた場合、強度低下が大きく、この現象は鋼繊維を混入しても改善されない。

Table 6 計測位置と最高温度の関係

Relation between measurement position and maximum temperature

計測位置 (加熱面からの深さ) (mm)	最高温度 (℃)
20	642
40	495
70	378
100	251
125	192
165	143
225	110
325	83
425	67

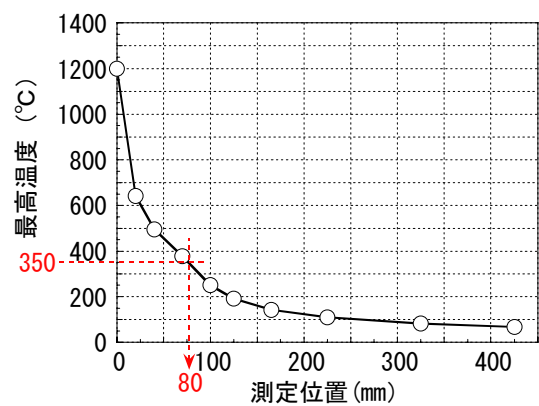


Fig. 11 計測位置と最高温度の関係

Relation between measurement position

and maximum temperature

- 3) 水酸化カルシウムの生成量を抑制したコンクリートは、600℃の高温履歴を受けた場合の圧縮強度残存比が高く、強度低下の抑制に有効である。
- 4) 水酸化カルシウムの生成量を抑制したコンクリートは、RABT 曲線を使用した実物大規模の耐火試験では爆裂現象が生じ、普通ポルトランドセメント等と比べ、爆裂が生じやすい傾向がある。そのため、低融点の有機繊維の使用など、さらに爆裂防止対策について検討する必要がある。

参考文献

- 1) CEB Bulletin D'Information No.208, 1991
- 2) 浦野知子, 他: 鋼繊維補強コンクリートの耐火性能, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.321-326, 2004
- 3) S.K.Handoo 他, Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperature, Cement and concrete Research 32, 2002, pp1009-1018